HOKKAIDO UNIVERSITY

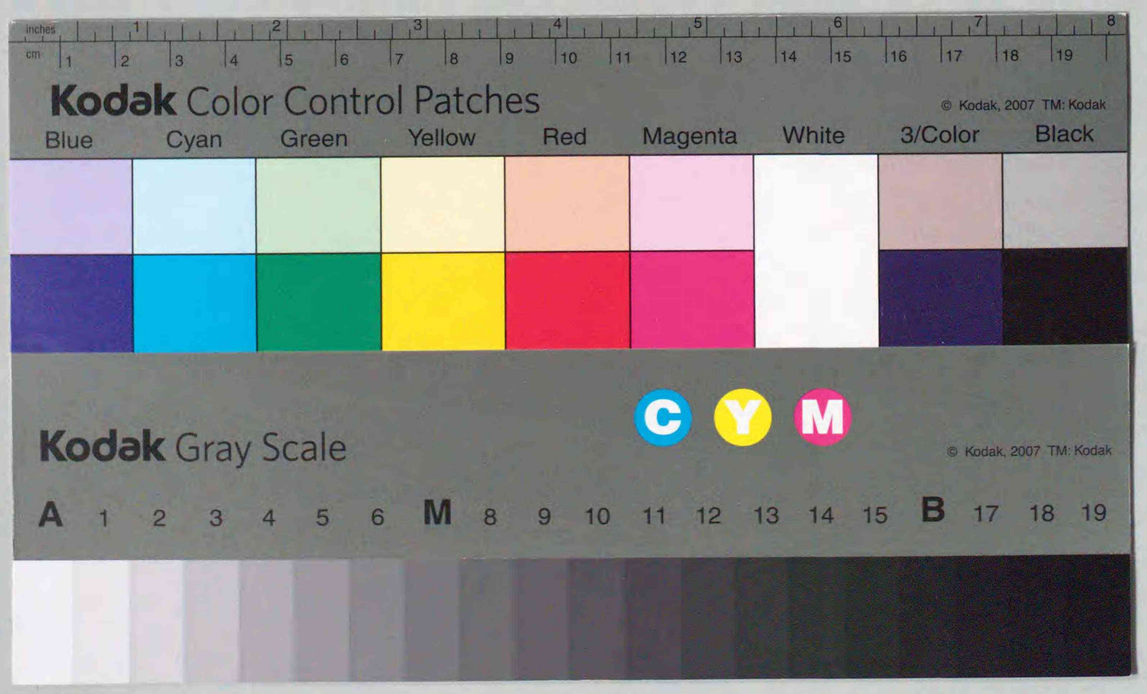
Title	汚損がいしのフラッシオーバ現象に関する基礎的研究
Author(s)	佐藤，正志
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第3902号
Issue Date	1991-03-25
DOI	https://doi.org/10.11501/2964271
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/49662
Type	doctoral thesis
File Information	000000238012.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

汚損がいしのフラッシオーバ現象に関する基礎的研究

1991年

佐藤　正志



(1)

汚損がいしのフラッシオーバ現象に関する基礎的研究

1991年

佐藤正志

目　次

序　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

第１章　緒　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4

１．１　本研究の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
１．２　従来の研究の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
＜１．２．１＞ がいし類の汚損フラッシオーバに関する研究 ・・・ 7
＜１．２．２＞ 汚損沿面アークの特性 ・・・・・・・・・・・・・ 8
１．３　本研究の目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
１．４　本研究の内容 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 20

第２章　汚損がいし面上における交流再点弧特性 ・・・・・・・・・・ 26

２．１　まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
２．２　実験の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
＜２．２．１＞ 実験装置 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
＜２．２．２＞ 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 28
＜２．２．３＞ 汚損帯 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
２．３　再点弧電圧とアーク電圧の周期的変化 ・・・・・・・・・・・ 33
２．４　全面汚損時の再点弧電圧特性 ・・・・・・・・・・・・・・・ 35
＜２．４．１＞ 再点弧数NによるV_r とV_a の変化 ・・・・・・・ 35
＜２．４．２＞ 全面非汚損時の特性との比較 ・・・・・・・・・・・ 40
＜２．４．３＞ V_R －ia 特性およびV_A －ia 特性 ・・・・・・ 42
＜２．４．４＞ 電圧比V_R ／V_A とアーク電流ia との関係 ・・・ 46
＜２．４．５＞ 再点弧電圧V_R と塩分付着密度w ・・・・・・・・ 46
２．５　部分汚損時の再点弧電圧特性 ・・・・・・・・・・・・・・・ 50
＜２．５．１＞ 再点弧電圧の周期的変化 ・・・・・・・・・・・・・ 50
＜２．５．２＞ V_R －ia 特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
＜２．５．３＞ 全面汚損時との比較 ・・・・・・・・・・・・・・・ 57
２．６　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 66

第３章　方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係 ・・ 69

３．１　まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 69
３．２　実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
３．３　フラッシオーバ電圧 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 74

＜3．3．1＞ V_f とBとの関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 74
＜3．3．2＞ 極小フラッシオーバ電界強度E_ℓ ・・・・・・・・ 76
3．4 最低フラッシオーバ電界強度E_B ・・・・・・・・・・・・・ 78
＜3．4．1＞ E_B とBとの関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
＜3．4．2＞ E_ℓ に対応する電圧上昇率B_ℓ ・・・・・・・・・ 80
＜3．4．3＞ B_ℓ の実験式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82
3．5 フラッシオーバ前の局部アーク放電 ・・・・・・・・・・・・ 85
＜3．5．1＞ 上昇率Bによる電流変化 ・・・・・・・・・・・・・ 85
＜3．5．2＞ 上昇率Bと局部アーク放電発生波数N ・・・・・・・ 88
＜3．5．3＞ Nとフラッシオーバ電圧V_f ・・・・・・・・・・・ 88
3．6 考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93
＜3．6．1＞ 交流汚損沿面アーク放電 ・・・・・・・・・・・・・ 93
＜3．6．2＞ 再点弧電圧の特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 95
＜3．6．3＞ 汚損沿面フラッシオーバ電圧V_f と
V_a およびV_r との関連 ・・・・・・・・・・・・・ 96
＜3．6．4＞ E_0 に関する検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 98
＜3・6．5＞ フラッシオーバ半波前の電流 ・・・・・・・・・・・ 100
3．7 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105

第 4 章 不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性 ・・ 108

4．1 まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 108
4．2 試料および実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 110
＜4．2．1＞ 試料 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 110
＜4．2．2＞ 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
4・3 非汚損部が中央にある場合 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 114
＜4．3．1＞ 非汚損部の長さによる影響 ・・・・・・・・・・・・ 114
＜4．3．2＞ 汚損幅の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 119
4・4 非汚損部が偏在している場合 ・・・・・・・・・・・・・・・ 122
＜4．4．1＞ E_B－B特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 122
＜4．4．2＞ フラッシオーバ時の極性 ・・・・・・・・・・・・・ 129
4．5 考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 131
＜4．5．1＞ 流し写真による検討 ・・・・・・・・・・・・・・・ 131
＜4．5．2＞ 非汚損部の存在による実効塩分付着密度 ・・・・・・ 135
4．6 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 138
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 140

第 5 章 実用がいし類を模擬した台形汚損帯における
交流フラッシオーバ特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 142

5．1 まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 142
5．2 実験の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 144
＜5．2．1＞ 台形汚損帯 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 144
＜5．2．2＞ 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 148
5．3 実験結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 150
＜5．3．1＞ 最低フラッシオーバ電界強度E_B ・・・・・・・・・ 150
＜5．3．2＞ 長幹がいしモデル ・・・・・・・・・・・・・・・・ 150
＜5．3．3＞ 円板形がいし連モデル ・・・・・・・・・・・・・・ 152
5．4 考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 159
＜5．4．1＞ 放電の挙動 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 159
＜5．4．2＞ フラッシオーバ電圧が低下する要因 ・・・・・・・・ 165
＜5．4．3＞ 形状係数に基づくE_B－B特性の実験式 ・・・・・・ 171
＜5．4．4＞ 極小フラッシオーバ電界強度E_ℓ となる
局部アーク放電の発生波数N_ℓ ・・・・・・・・・ 175
5．5 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 179
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 181

第 6 章 氷結時における汚損がいしのフラッシオーバ現象の基礎特性 ・・ 184

6．1 まえがき ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 184
6．2 実験方法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 186
6．3 氷結時の塩分付着密度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 189
6．4 氷結状態によるフラッシオーバ特性の差異 ・・・・・・・・・ 192
＜6．4．1＞ フラッシオーバ電界強度と電圧上昇率 ・・・・・・・ 192
＜6．4．2＞ 局部放電の発生状況 ・・・・・・・・・・・・・・・ 198
6．5 同一塩分付着密度で氷結状態が異なる場合の
フラッシオーバ特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 207
＜6．5．1＞ 氷結汚損帯の作製方法 ・・・・・・・・・・・・・・ 207
＜6．5．2＞ フラッシオーバ電界強度の極小値E_ℓ ・・・・・・ 209
6．6 まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 216
参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 217

第 7 章 結 論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 219

7．1 本研究の主要な結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 219
7．2 本研究の工学的意義 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 227
7．3 今後に残された問題点 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 230

謝 辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 232

序　言

わが国の電力系統が被る自然災害の代表的なものとして、雷現象と並んで汚損フラッシオーバ現象によるものが挙げられる。事故率からみると前者の割合が後者に比べて著しく高くなっているが、後者の事故数も決して少ないとはいい難い。特に、日本海沿岸地域においては、冬期の季節風に起因するがいしのフラッシオーバ事故率が高くなっている。また、雷による事故は系統電圧とは直接関連しないが、汚損フラッシオーバ事故は系統電圧が高くなるに伴って多発する危険性をもっているものと考えられる。更に、汚損による事故は発生箇所が広範にわたるという厄介な特徴ももっている。近年の増大する電力需要と電源の遠隔化は系統電圧の上昇をもたらし、わが国においてもＵＨＶ送電が実用化されつつある。従って、がいしに代表される高圧絶縁機器類の汚損対策は更に重要性を増してくるものと考えられる。

本研究は、このような背景のもとに主としてがいしの汚損フラッシオーバ電圧を低下させる因子を明らかにするため基礎的な実験を行ったものである。これは、従来各所で行われている人工汚損試験の結果の中で、著しく低いフラッシオーバ電圧値が統計的な処理をする過程で埋没している例をしばしば目にしたことに端を発している。すなわち、従来の耐電圧設計基準からは予測し難いような状況下でがいしのフラッシオーバ事故が起こるのは、このような異常に低い値を生ずる条件が実課電状態においても存在するためであると考えた。

そこで、本研究はこの点を明らかにするため、既存の人工汚損試験法の中でも最も最低値が得られやすい試験法であるとされている「等価霧中法」に準じて種々の基礎的な実験を行った。また、実験結果の解析を容易にするため実用がいしの複雑な形状を避け、平板がいし面上に作製した方形状や台形状の幾何学的に単純なモデル汚損帯を試料

として用いた。

本論文は７章から構成されている。

第１章は緒論であって、本研究の背景、従来の研究の概要ならびに本研究の目的と内容の概略について述べている。とりわけ、従来の研究の概要においては、本研究の基礎をなし、著者もその一員として研究を行った汚損沿面アークの特性について概説している。

第２章では、「汚損がいし面上における交流再点弧特性」について述べている。これは、再点弧時の電圧特性が、従来検討を行ってきたアーク放電の特性に比べて汚損がいしのフラッシオーバ特性に対してより密接な関連があるものとみなされるためである。

第３章では、「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」について述べている。わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである等価霧中法は、がいしの最低フラッシオーバ電圧が得られやすいことから今日に至るまで広範に採用されている。この等価霧中法は、電圧印加法として電圧を一定の上昇率で上昇させる電圧上昇法を採用している。しかし、本法における電圧上昇率がフラッシオーバ電圧に及ぼす影響については、従来ほとんど検討されていなかった。ここではこの点に着目し、実験的な検討を行っている。

さて、第３章では電極間の全面が平等に汚損された方形状のモデル汚損帯を用いてフラッシオーバ電圧の検討を行った。しかし、がいし類は一般に不平等に汚損されている。そこで、次の第４章と第５章では不平等に汚損したモデル汚損帯を用いて前章と同様な実験的検討を行った。

まず第４章では、「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」について述べている。ここでは、がいし面上に形成された二つの局部的な汚損部が湿潤と共に汚損成分による細い電流通路で連結された場合を模擬した。このため、電極間に非汚損部を設け、

これに汚損部と同一の汚損液でできるだけ細い電流通路を設けた不平等汚損モデルを対象とした。

次に第５章では、「実用がいし類を模擬した台形汚損帯における交流フラッシオーバ特性」について述べている。本章におけるモデル汚損帯は台形状である。台形汚損帯では狭幅部の電流密度が高いので汚損層の乾燥が早いためこの部分で放電が発生しやすくなる。ところで、実用がいしにおいても狭幅部が存在し、従って台形汚損帯における実験結果は実用がいしの結果と強い類似性をもつものと考えられる。本章では、台形汚損帯のこのような特徴を基に、同一汚損長の円板形がいし連と長幹がいしとの比較のためモデル実験を行った。台形汚損帯を数個連結し、その連結部に金属板を置いて円板形がいし連モデルとした。また、金属板を置かない場合を長幹がいしモデルとした。

第６章では、「氷結時における汚損がいしのフラッシオーバ現象の基礎特性」について実験的な検討を行った。日本海沿岸地域においては、冬期のフラッシオーバ事故率が他期に比べて著しく高いことが報告されている。これは、北海道や東北などの降雪寒冷地域においては冬期に送電線路のがいしが氷結、つららあるいは冠雪によってフラッシオーバ事故を起こすためである。しかし、これらの事故は単に雪氷によるがいし漏れ距離の減少のみによるのではなく、ほとんどの場合塩分汚損が介在している。そこで本章においては、冠雪に関する研究に比べて立ち後れが目立つ氷結時の汚損フラッシオーバ特性について検討を行った。実験は、冷凍庫内で３種類の汚損氷結状態を模擬的に作製し、電圧上昇法によってそれぞれのフラッシオーバ特性の違いについて調べた。

第７章は結論であって、本研究において得られた知見とその工学的意義、ならびに今後に残された問題点について述べている。

第１章　緒論

四方を海に囲まれているわが国においては、その地勢上電力系統が海塩による汚損を受けやすい[1]。汚損によるフラッシオーバ事故は雷による事故に比べて件数は少ないが、系統電圧の影響を受けやすく、また事故点が広範囲にわたるという厄介な特徴をもっている。更に、近年の系統電圧の上昇に伴い、日本海沿岸の冬期季節風や台風による一時的な急速汚損はもとより、従来海塩の影響が少ないとされてきた軽汚損地域においても被害が現れている[2]。

汚損がいしに関する研究の歴史は古い。このため、一般にはそのほとんどが解明されているかのような認識がもたれている。しかし、複雑な自然条件下で使用されるがいし類の汚損フラッシオーバ機構など基礎的事項については不明な点が多い。また、近年電力需要の増大と電源の遠隔化に伴いＵＨＶ送電が計画され[3]、高電圧化が世界的に進められている。特にわが国の電力系統においては、がいし類の汚損耐電圧の向上は急務であり、汚損フラッシオーバに関する研究の重要性はいささかも失われていない。

１．１　本研究の背景

送電線がいし類の汚損によるフラッシオーバ現象は、雷現象と並び電力の輸送上長年にわたり重要な課題とされてきている。すなわち、１８９１年にはすでに１００マイルの Lauffen-Frankfort線（３０ｋＶ）において長距離送電線の塩害防止のための最初の実験が行われている[4]。また、がいしの汚損に関する系統的な研究は、

１９０７年に Anfossi氏がイタリアの海岸線に沿った２５ｋＶ送電線で行った研究が最初とされている[4]。更に、理論的研究は、汚損面の抵抗率や乾燥帯形成の重要性を示した Obenaus氏の１９３０年代の研究から始まったと考えられている[4]。

わが国において塩害事故の問題が本格的に取り上げられるようになったのは昭和２８年の台風塩害以来であり、昭和３６年９月の第２室戸台風により発生した大事故もまた研究に拍車をかける契機となった[5]。以来３０余年にわたり数多くの研究成果が報告されている。電気学会の調査[6]によると、これらに関する研究の発表件数は１９６４年（昭和３９年）～１９８３年（昭和５８年）の２０年間だけで実に８４２件にも及んでいる。しかし、その内訳をみると、交流、直流あるいは短時間過電圧の違いはあるものの、実規模の試験設備による耐電圧試験の結果に関する報告が圧倒的に多くなっている。従って、汚損フラッシオーバ機構など基礎的な事項に関する研究は極めて数が少ない。電力会社などのがいしを実用する立場からみると、実証試験の結果は直ちに現場へ反映する点で貴重であろう。しかし、このようなおびただしいデータに裏付けされた送変電設備において、現在でもなおがいしの汚損フラッシオーバ事故は発生している[2]。これは、次に述べるように、がいしの汚損フラッシオーバ電圧を低下させる要因についての検討がいまだ不十分であることを示唆している。

一般に、がいしの人工汚損試験では試験結果の評価は何らかの統計的処理によっている。例えば、わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである等価霧中法[7]においては、得られた１０回のフラッシオーバ値が正規分布Ｎ（μ，σ^2）をなすものとして、５％値

（$\mu-1.64\sigma$）をもって「最低フラッシオーバ電圧」としている。このようにして得られた２５０mm標準懸垂がいし連の塩分付着密度w（mg/cm^2）と最低フラッシオーバ電圧（kV）との関係は次の実験式で表され、耐電圧設計曲線として広く用いられている[8]。

$$V = \frac{28}{(w/0.1)^{1/5}\{1.5(k^{1/5}+2)+(5/8)k\}} \cdot K \cdot N \quad (kV) \cdots\cdots\cdots (1.1)$$

ここで、kはとのこの付着密度（mg/cm^2）で設計上は0.1mg/cm^{2}を用いる。また、Kは係数で、設計上は 1.15 あるいは 1.25 を用いる。更に、Nはがいし連結個数（個）である。

一般に、この試験法によって得られるフラッシオーバ電圧のばらつきはかなり大きく、しばしば（１．１）式で求められる値より著しく低い値を示すことがある。このような場合でもσの値によって５％値が定まるため、実測の最低値は無視されることがある。実課電時には、（１．１）式の耐電圧設計基準からは予測し難いような状況下でフラッシオーバ事故が発生しているものと考えられる。従って、前述の統計処理をする過程で無視されるような異常に低いフラッシオーバ値が生ずる原因を明らかにし、その対策を講じなければ汚損フラッシオーバ事故の根絶には至らないものと考えられる。

１．２　従来の研究の概要

＜１．２．１＞ がいし類の汚損フラッシオーバに関する研究

既に述べたように、がいし類の汚損フラッシオーバ現象に関する研究は古くから行われている。従って、その研究方法も多岐にわたるが、大別すると次のようになる。

（１）実際の送電線や暴露試験場における自然汚損試験

（２）汚損を模擬した状態で行う人工汚損試験

（３）モデル汚損帯による基礎実験

これらのうち、（１）項および（２）項は供試がいし連の絶縁耐力を直接知るための実証試験である。とりわけ、（２）項の人工汚損試験は（１）項の自然汚損試験に比べて再現性がよく、また短時間で数多くのデータが得られるという簡易性の点で優れているため最も一般的に行われる試験法である。しかし、がいしの使用環境は地理的にも気候的にも様々であるため、これを模擬した人工汚損試験も課電方法や汚損方法に関して各国で大きく異なり、試験法の種類もおびただしい数がある[7]。このため、同一のがいしに対する絶縁耐力や各種がいし間の優劣順位（Order of merit）の評価も試験法によって異なっているのが現状である。このことは系統の絶縁設計上はなはだ不都合であるため、異なった試験法によるデータの互換性を確立しようとする試みもみられる[9]。

これに対して、（３）項のモデル汚損帯による基礎実験は、汚損フラッシオーバ現象を電解質液面を進展する放電現象としてとらえ、主として局部アーク放電の電圧、電流の静特性からフラッシオーバへの移行条件を解析的および実験的に求めようとする方法である。本研究はフラッシオーバ移行臨界条件を求めることを直接の目的としてはいない。しかし、本研究がモデル汚損帯を用いた基礎実験で

あることと、汚損沿面アークの特性と密接な関連を持っていることの二つの理由から、（３）項の基礎実験に関連して汚損沿面アーク特性に関する著者らの従来の研究結果について、ここで少し詳しく述べておく。

＜１．２．２＞ 汚損沿面アークの特性[10]

課電状態のがいし類は塩類、塵埃あるいは工業塵などで汚損されている。この汚損物質が雨や霧、露などによって湿潤すると導電性を呈するようになり、がいし表面には漏れ電流が流れる[11]~[14]。この漏れ電流はがいし表面の汚損液膜を不均一に加熱乾燥する。そしてがいし表面に局部的に乾燥帯を形成し、条件によってはその両端をアーク放電すなわち局部アーク放電が橋絡する[15][16]。局部アーク放電は乾燥帯の両端近傍にアークスポットを生ずる。このアークスポットは電流通路としての湿潤面を求めて移動しながら条件が満たされると電界方向に伸長し、ついにはフラッシオーバへと至る。印加電圧が商用周波交流の場合には、正および負の半波毎に局部アーク放電の生成と消滅あるいは伸長が繰り返されてフラッシオーバへと移行する[17]~[21]。

従って、汚損フラッシオーバ移行条件に関しては、局部アーク放電で橋絡される部分の分担電圧、その残部である汚損液膜部分の分担電圧、および局部アークスポットでの電極降下の三者の和の形で解析が行われている[12][14][22]。しかし、従来の報告では、実際に近い汚損沿面における局部アーク放電の電圧、電流特性を用いていない。すなわち、局部アーク放電電圧については検討が行われず、これを空気中あるいは水蒸気中におけるアークの電圧、電流特性で

置き換えている。従って、汚損フラッシオーバ電圧が主として汚損面の漏れ抵抗のみの関数となっている。これは、汚損面に付着する汚損成分の種類およびその付着密度には直接関係がなく、等価塩分付着密度（種々の溶解性汚損成分の導電率を等価的にＮａＣｌのそれとして求めたもの）という概念で表面抵抗を取り扱っている。

一方、各種塩類を用いた場合の霧中フラッシオーバ電圧と等価塩分付着密度との関係について実験的に検討した結果が報告されている[23]。これによると、同一の等価塩分付着密度においても溶解性汚損成分によってフラッシオーバ電圧が著しく異なる。特に、溶解性成分としてＮａＣｌを用いた場合のフラッシオーバ電圧が最も低くなることが明らかにされている。

また、著者の研究室においても、門脇氏らによる「小口径ノズル方式による充電がいしの注水洗浄に関する研究」[24]を通じて次のような知見が得られた。すなわち、抵抗率を食塩（ＮａＣｌ）の溶解量で調整した塩水をノズルから課電がいしに注水すると、ノズルががいしに著しく近接するとフラッシオーバが生ずる。この場合、フラッシオーバ電圧は注水の抵抗率がある値より低下すると著しく低くなる。また、そのフラッシオーバ前の沿面放電はＮａ原子の炎色反応を呈し、注水に沿ってストリーマ状に進展する。更に、門脇氏らによる「蒸気車の噴出排煙によるがいしの表面漏れ電流に関する研究」[25]からは次のようなことが分かった。約２年間にわたる連続的な測定を行ったが、蒸気車の噴出排煙のみによってはフラッシオーバ事故に至らなかった。すなわち、等価塩分付着密度がほぼ０．４３mg/cm²という異常に高い値を示す汚損状態にもかかわらずフラッシオーバが起こらなかった。

これらの実験結果は汚損成分によってフラッシオーバ電圧に差異が生ずることを示唆しているが、従来の汚損フラッシオーバ機構に関する解析結果ではこれを十分に説明することはできない。そこで、加賀氏ら[26]は、溶解性汚損成分によってフラッシオーバ電圧に差異が生ずるのは、フラッシオーバ時点の汚損沿面アークの電圧、電流特性が汚損成分ならびにその付着密度によって変化するためであると推測した。また、溶解性汚損成分の中でＮａＣｌ汚損の場合にフラッシオーバ電圧が最も低くなるということは、局部アーク放電によって放電空間に蒸発・飛散する電離電圧の低いＮａ原子のアークコラム中での挙動によるものと考えた[26]～[28]。特に、交流電圧印加のもとでは局部アーク放電は印加電圧の正、負半波毎に生成と消滅あるいは伸展を繰り返してフラッシオーバへと進展するものである[17]～[20][29][30]。従って、フラッシオーバへ移行する際の局部アーク放電の電圧、電流特性の把握が必要である。

そこで、以上の推論を実証するため、著者らはＮａＣｌ汚損沿面におけるフラッシオーバ後のアークの特性とＮａＣｌ付着密度との関係について実験的検討を行った。実験方法は第２章の「汚損がいし面上における交流再点弧特性」と同一であるので本節での重複を避けるが、概略は次の通りである。平板がいし面上の乾燥した方形汚損帯に一定電圧を印加してこれに加湿する。最初に生ずるフラッシオーバ後のアークコラムが浮上しない範囲で、少なくとも２０半波（２００ms）程度再点弧を繰り返させる。その各半波における最大アーク電流ｉａとそれに対応するアーク電圧Ｖａを測定した。得られた結果を摘記すると次のようになる。

（１）アーク電圧Ｖａは半波毎の再点弧の繰り返しに伴って初め

漸減するが、極小値V_Aを経て上昇に転ずる。

（２）アーク電圧は電極材質によってほとんど変化しない。

（３）アーク電圧は局部アーク放電の発生位置、印加電圧の高低ならびに気温によって大きなばらつきを示す。これは、フラッシオーバ前の局部アーク放電による汚損面からのＮａ原子の蒸発・飛散、ならびにその累積や拡散に基づくフラッシオーバ空間における分布がアーク電圧を支配しているためと考えられる。

（４）アーク電圧は気温に大きく依存する。すなわち、気温ｔ（℃）および２０℃における極小値V_AをそれぞれV_{At}、V_{A20}とすると、次のような実験式が得られた。

$$V_{At}=V_{A20}[1+0.01(t-20)] \quad \cdots\cdots (1.2)$$

（５）アークの電圧、電流特性はアーク電流ｉａの大、小によって二つの領域に分けられる。大電流領域（ほぼｉａ＞０.５A）の特性は、空気中のアークのそれに近づいている。

（６）小電流領域（ほぼｉａ＜０.５A）における極小アーク電圧V_Aは気温３０℃において、汚損長ℓ、塩分付着密度ｗおよびアーク電流ｉａに関して次式のように表すことができる。

$$V_A=19\ell(wk^{1/3})^{-1/5}i_a^{-1} \quad (V) \quad \cdots\cdots (1.3)$$

すなわち、アーク電圧の極小値V_Aはアーク電流ｉａの－１乗に比例し、その積($V_A i_a$)は一定になる。更に、極小値V_Aはｗの－０.２乗に比例しており、これは（１．１）式の耐電圧設計基準として用いられている２５０mm標準懸垂がいしの最低フラッシオーバ電圧の塩分付着密度依存性と一致している。

（７）（１．３）式を求めるにあたってのアークの電極降下は約１５Ｖ程度となり、無視することができる。

（８）従来の報告における等価アーク抵抗は塩分付着密度の因子を含まず、またフラッシオーバの解析としては主として表面漏れ抵抗のみを扱っている。著者らの研究結果では、漏れ抵抗は塩分付着密度によって著しく変化している。

以上の実験的検討の結果から、小電流領域（ほぼｉａ＜０.５A）におけるアークの特性は、主としてアークスポットの進展によって汚損面から蒸発・飛散する電離電圧の低いＮａ原子の挙動によるものと推測した。

次に、以上の実験的検討の結果得られたアークの諸特性について解析的検討を試みた[26]～[28][31]。

交流汚損沿面アーク電圧は、（１．３）式に示すようにアーク電流ｉａが小さい範囲ではｉａの－１乗に比例し、塩分付着密度ｗの－０.２乗に比例することが分かった。局部アーク放電によって汚損皮膜が飛散すると同時にＮａ原子が空間に拡散していくことは容易に推測される。そこで、局部アーク放電により汚損皮膜から蒸発・飛散する電離電圧の低いＮａ原子に注目し、またＮａ原子の熱電離による電子電流がアーク電流の主源をなすものとして考察を行った。その結果を摘記すると次のようになる。

（１）塩分付着密度ｗが0.392mg/cm^2 におけるアークコラムの温度T_{392} を 2,000～3,000Ｋにとると、アークコラムの電位傾度E_wはアーク電流I_w の約－０.９乗に比例することになり、実験結果の－１乗に近い値となる。

（２）塩分付着密度ｗ＝0.392mg/cm^2 を基準として、アーク電流I_wがＯ.１Aにおけるコラムの電位傾度E_wとｗとの関係を求めた。その結果、T_{392} が 2,650ＫにおいてE_wはｗのほぼ－０.２乗に

比例することが分かった。

（３）大電流領域（ほぼｉａ＞０.５A）においては電圧、電流特性の傾斜が小さくなっている。これは、アーク電流の増大に伴ってアークコラムが汚損面から浮上しがちになるためと考えられる。すなわち、アークコラムが浮上することによってその長さが大となりアーク電圧は高くなるものと考えられる。

（４）アークコラム中のＮａ原子の拡散は気温に依存する。これをもとに特性の解析を行った結果、アーク電圧の気温依存性は実験結果と一致し、（１．２）式で表されることを示した。

以上の実験的検討ならびに解析的な検討の結果、汚損沿面アークは主としてアークコラム中のＮａ原子の熱電離に基づくものであるという推論が妥当であると言う結論に達した。本研究はこの汚損沿面アーク特性の検討結果に基づき、これを再点弧電圧特性、更にはフラッシオーバ電圧特性にまで検討を進めている。

１．３　本研究の目的

交流汚損フラッシオーバ現象に影響を及ぼす因子は数多くあるものと考えられる。著者は本論文において、いかなる条件のもとでフラッシオーバ電圧が低下するかを明らかにすることを目的に種々の検討を行った。これは、従来各所で行われている人工汚損試験の結果の中で、著しく低いフラッシオーバ電圧値が統計的な処理をする過程で埋没している例をしばしば目にしたことに端を発している。すなわち、従来の耐電圧設計基準（（１．１）式）からは予測し難いような状況下でフラッシオーバ事故が発生するのは、このような

異常に低い値が生ずる条件が実課電状態において存在するものと考えた。従って、汚損フラッシオーバ現象に影響を及ぼす因子のうち最も重要なものの１つであるフラッシオーバ電圧を低下させる因子を明らかにできれば、耐汚損性能の優れたがいしの開発・設計や系統絶縁の保守、管理の有益な資料となり、工学的に有意義である。

そこで、本研究を次のようなステップで進めた。

（１）初めに、前節で述べた汚損沿面アーク特性に基づき、フラッシオーバ電圧に対してアーク電圧より、より直接的な関連をもつと思われる再点弧電圧の特性について検討する。

（２）既存の人工汚損試験法の中では最も苛酷で最低値が得やすいとされている等価霧中法[32]（電圧印加法として電圧上昇法を採用している）により、

①電極間の電流密度がほぼ均一な方形状のモデル汚損帯

②電流密度が不均一な部分汚損、台形状のモデル汚損帯

を対象として、主にフラッシオーバ電圧と印加電圧の上昇率との関係について調べる。

（３）次に、日本海沿岸地域では冬期のフラッシオーバ事故率が他期に比べて高くなっている[33][34]ことから、冬期の事故原因の代表としてがいしの塩水による氷結時を模擬し、そのフラッシオーバ特性について検討する。

なお、等価霧中法はあらかじめがいしに汚損を施し、その後電圧を印加するいわゆる汚損先行法（Pre-deposit法）[7]である。これに対して実際の送電線においては、一般に課電中のがいしが汚損を受け（電圧が先行）、これが霧や小雨などによって湿潤する。従って、等価霧中法は実際の使用状態とがいし表面状態が異なるとみる

向きもある。しかし、実課電時のように電圧が先行しその後湿潤汚損を被る場合には、汚損面の吸湿速度がフラッシオーバ電圧を大きく支配するものと考えられる。このような状態に対して再現性のある実験を行うことは著しく困難である。これに対して本研究では、汚損液膜の蒸発、減少と密接な関係をもつ電圧上昇率を種々変えて等価霧中法を行っている。電圧上昇率が変われば同一の印加電圧においても局部アーク放電の発生状況が異なり、これが汚損フラッシオーバ電圧に著しい影響を及ぼすことになる。また、電圧上昇法は、定電圧印加法に比べて短時間でフラッシオーバに至るため、局部アーク放電の発生状況とフラッシオーバとの関連を明確にしやすいなどフラッシオーバ現象の検討に都合がよい。これらの点から、本研究結果は実課電時のフラッシオーバ特性を検討するための基礎資料として十分に有効であるものと考えられる。

１．４　本研究の内容

本研究の一つの特色は、電圧印加からフラッシオーバまでの局部アーク放電の伸展過程を流し撮りによる写真撮影を行って検討した点である。従来、交流フラッシオーバ現象に関する研究では電圧と電流を測定し、そこから得られる静特性によってフラッシオーバへ移行する臨界条件を求める手法が主体であった[11]～[14]。少数ではあるが、高速度カメラによる撮影例はあるが[18]、流し写真は直流[35]やインパルスなどの短時間過電圧[36]を除けばほとんど見当たらない。これは、実用がいしでは放電の発生位置が定まらないことの他に、交流汚損フラッシオーバ現象が電圧上昇法においては数

秒～数１０秒、定電圧印加法においては印加電圧にもよるが数１０分に及ぶことがあり、フラッシオーバ現象と撮影のタイミングとを同期させることが著しく困難なためである。本研究においては、平板がいし面上にモデル汚損帯を作製し、これを電圧上昇法でフラッシオーバさせることにより流し写真の撮影を可能にした。

以下に、本論文の内容について述べる。

本論文は７章から構成されている。

第１章は緒論であって、本研究の背景、従来の研究の概要ならびに本研究の目的と内容について述べている。とりわけ、従来の研究の概要においては、本研究における考察の基礎をなし、著者もその一員として研究を行った汚損沿面アーク特性について概説している。

第２章では、「汚損がいし面上における交流再点弧特性」について述べている。これは、本論文の主題である交流汚損フラッシオーバ電圧特性の基本をなす実験的検討である[37]～[41]。従来は、主としてフラッシオーバ後のアーク放電の電圧特性（汚損沿面アーク特性）について検討を行ってきた。しかし、アーク放電特性より再点弧特性の方がよりフラッシオーバ特性に密接な関連をもつものとみなされた。そこで本章においては、がいし面上の乾燥汚損帯に一定電圧を印加し、これに加湿してフラッシオーバさせた場合に半波毎に繰り返す再点弧の電圧特性について検討している。その結果、アーク電圧と同様に、再点弧電圧も再点弧の繰返しに伴って低下し、最低値を経て上昇に転ずることが分かった。このことは、再点弧電圧が汚損面上の放電空間におけるＮａ原子の挙動に依存することを示しており、第３章以降の汚損フラッシオーバ特性の検討に対して重要な示唆を与えている。

第３章では、「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」について述べている。ここでは、方形状のモデル汚損帯を用いて、フラッシオーバ電圧の印加電圧の上昇率に対する依存性を明らかにした[42]～[44]。すなわち、フラッシオーバ電圧はある上昇率のもとで最も低い値（極小値と称する）を示すことが分かった。本章においては、極小フラッシオーバ電圧とそれが生ずる上昇率の実験式を示している。また、等価霧中法において電圧上昇率を十分小さくしたときの最低フラッシオーバ電圧が定印霧中法における最低値にかなり近い値であることを明らかにした。更に、流し写真によって局部アーク放電の発生状態が電流と同期していることが分かった。これによって、フラッシオーバに至るまでに局部アーク放電が発生した半波数を測定した。その結果、局部アーク放電の発生波数は電圧上昇率にほぼ逆比例することがわかった。このことから、第２章における再点弧の繰返し数を局部アーク放電の発生数に置き換えることにより、極小フラッシオーバ電圧の存在を定性的に説明している。

第４章では、「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」について述べている。実用がいし類は一般に不平等に汚損されている[45]～[47]ことから、第３章のモデルのように電極間が平等に汚損されている場合の他に、不平等に汚損されて各部分の電流密度が異なる場合について検討しておく必要がある。ここでは、がいし面上に形成された２つの汚損部が湿潤と共に汚損成分による細い電流通路で連結された場合を模擬したモデル汚損帯を用いて検討を行った[48]～[50]。その結果、電流通路のある非汚損部の長さが電極間距離の２０％まではそれが電極間のどこにあっても、

最低フラッシオーバ電圧およびその電圧上昇率依存性は全面汚損の場合と同等であるという興味ある結果が得られた。

第５章では、「実用がいし類を模擬した台形汚損帯における交流フラッシオーバ特性」について述べている。これは、台形状の汚損帯では狭幅部の電流密度が高いためこの部分で放電が始発しやすい点に着目している。すなわち、円板形がいし連の連結効果や、長幹がいしの笠部と胴部を模擬したものである[51]～[54]。その結果、従来その原因が不明確であった「同一漏れ距離ならば円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低い」という人工汚損試験の結果を、放電特性から説明することができた。すなわち、円板形がいし連モデルの方が長幹がいしモデルより局部アーク放電が連続して発生しやすいことが流し写真から分かり、これがフラッシオーバ電圧低下の主因であると推断するに至っている。

第６章では、「氷結時における汚損がいしのフラッシオーバ現象の基礎特性」について述べている。日本海沿岸地域においては、冬期のフラッシオーバ事故率が他期に比べて著しく高いことが報告されている[33][34]。これは、北海道や東北などの降雪寒冷地域においては冬期に送電線路のがいしが氷結、つららあるいは冠雪によってフラッシオーバ事故を起こすためである。しかし、これらの事故は単に雪氷によるがいし漏れ距離の減少のみによるのではなく、ほとんどの場合塩分汚損が介在しているものと考えられる。そこで本章においては、冠雪に関する研究に比べて立ち後れが目立つ氷結時の汚損フラッシオーバ特性について検討した[55][56]。その結果、鉄塔からの融雪水のように低濃度の塩水でも、氷結時にはがいし面の塩分付着密度が著しく高くなり得ることを明らかにした。また、

氷の融解が進み水分がかなり多いシャーベット状の氷結状態では、ほとんど全面が凍結状態にある場合に比べ局部放電の伸びや空間への広がりが顕著である。この場合、最低フラッシオーバ電圧は常温時のそれより約２０％低下することが明らかになった。

第７章は結論であって、本研究において得られた主要な知見とその工学的意義、ならびに今後に残された問題点について述べている。

参考文献

（１） 電気学会：「がいしの霧中汚損試験法の検討」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第146号、p.1（昭58）

（２） 絶縁設計合理化専門委員会：「絶縁設計の合理化」、電気協同研究、第４４巻、第３号（昭63）

（３） 関根・野村：「総論：ＵＨＶ送電技術の開発動向と今後の展望」、ＯＨＭ、75,10, p.25(1988)

（４） D.C.Jolly,"Contamination Flashover, Part Ⅰ:Theoretical Aspects", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-91, No.6, p.2437(1972)

（５） 塩害対策専門委員会送変電分科会(1)：「送変電設備の塩害対策」、電気協同研究、第２０巻、第２号（昭39）

（６） 電気学会：「がいし汚損に関する文献集」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第213号、（昭61）

（７） 電気学会試験電圧標準特別委員会絶縁試験法小委員会編：「絶縁試験法ハンドブック」、p.287（昭51）、オーム社

（８） 電気学会：「架空送電線路の絶縁設計要綱」、電気学会技術報告（Ⅱ部）第220号、p.57（昭61）

（９） M.P.Verma, H.Niklash, W.Heise, H.Lipken, G.F.Luxa & H.Schreiber:"The Criterion for Pollution Flashover and its Application to Insulation Dimensioning and Control", CIGRE Report 33-09(1978)

（10） 加賀：「汚損がいしのフラッシオーバ現象に関する研究」（学位論文、北海道大学、1979）

（11） F.Obenaus, D.Beyer und D.Bahrs,"Ueber den Fremdschichtwiderstand und die U-I-Kennlinie des Vorlichtbogens beim Kriechueberschlag", Wiss Z. Hochsch. Elektrotech Ilmenau, 5, s.31(1959)

（12） L.L.Alston & S.Zoledziowski,"Growth of discharges on polluted insulation", Proc.IEE, 110, 7, p.1260(1963)

（13） B.F.Hampton,"Flashover mechanism of polluted insulation", Proc.IEE, 111, 5, p.985(1964)

（14） H.H.Woodson & A.J.McElroy,"Insulators with Contaminated Surfaces,Part Ⅱ:Modeling of Discharge Mechanisms", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89, 8, p.1958(1970)

（15） 竹村：「送電線の塩じん害対策」、電気学会雑誌 80, 864, p.119(1960)

（16） 広瀬、瀬田：「塩じん害対策」、電気学会雑誌 80-8,911, p.11(1964)

（17） 中島：「汚損によるがいしの閃絡電圧の低下」、電気学会雑誌 74, 791, p.894(1954)

（18） 冨永：「汚損面の霧中交流フラッシオーバについて」、電気学会雑誌、88-12, 963, p.2310(昭43)

（19） W.Frischmann,"Fremdschichtueberschlag und Fusspunktwanderung", Dtsch.Elektrotechnik,Heft 7, s.290(1957)

（20） E.Nasser,"Zum Problem des Fremdschichtueberschlages an Isolatoren", ETZ-A, Bd.83, H.11, s.356(1962)

（21） E.Nasser,"Some Physical Properties of Electrical

Discharges on Contaminated Surfaces", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems,PAS-87,No.4, p.957(1968)

(22) R.Wilkins,"Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films",Proc.IEE, 116, No.3, p.457(1969)

(23) 比留間、大窪、近藤：「がいしの汚損せん絡特性」、昭和４３年電気四学会連合大会、No.968

(24) 門脇：「小口径ノズル方式による充電がいしの洗浄に関する研究」（学位論文、北海道大学、1970）

(25) 門脇、赤上、加賀、佐藤：「蒸気車の噴出排煙によるがいしの表面漏れ電流に関する研究」、電気学会雑誌、88-3, 954,(昭43)

(26) 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの特性（塩分付着密度依存性）」、電気学会論文誌 B-98,5, p.425(昭53)

(27) 加賀・佐藤・赤上・朝野：「交流汚損沿面アーク特性の機構について」、昭和51年電気学会全国大会、No.1012

(28) 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの塩分付着密度依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D14

(29) 加賀・斉藤・赤上：「汚損面上の局部アークの伸展について」、昭和48年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2C17

(30) 加賀・佐藤・斉藤・赤上：「課電吸湿汚損面上の交流アークの始動特性」、昭和50年電気学会全国大会、No.1239

(31) 加賀・佐藤・朝野・赤上：「交流汚損沿面アークの気温依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D12

(32) S.Fujitaka, T.Kawamura, S.Tsurumi, H.Kondo, T.Seta & M.Yamamoto",Japanese Method of Artificial Pollution Tests on Insulators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-87, No.3, p.729(1968)

(33) 東北電力（株）総合研究所：研究報告,No.76020(1977)

(34) 五十嵐・石垣・田口・佐藤・加藤：「降雪期におけるがいしの汚損耐電圧特性」、東北電力期報、No.42, p.80(昭54)

(35) D.C.Jolly, T.C.Cheng & D.M.Otten,"Dynamic Theory of Discharge Growth over Contaminated Insulator Surfaces", Paper C74 068-3, IEEE PES Winter Meeting, New York, N.Y.,(1974)

(36) 西村・中島：「電圧－時間特性からみた汚損沿面放電特性の検討」、電気学会論文誌 B-95, 2, p.57(昭50)

(37) 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面交流アーク電圧とフラッシオーバ電圧との関係」、電気学会放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-83-44,EIM-83-54, P.75(1983)

(38) 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時における再点弧電圧とアーク電圧との関係」、昭和58年度電気学会東北支部連合大会、No.2E10

(39) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Reignition Voltage and Arc Voltage on Contaminated Insulator Surfaces",Jpn. J. Appl. Phys., 23, 8, p.1094(1984)

(40) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reigniting Discharge

Characteristics on Contaminated Insulator Surface", Annual Report of CEIDP, No.Ⅳ-8, Claymont,DE,USA p.246(1984)

(41) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reignition Voltage on Partially Contaminated Insulator Surfaces", Jpn. J. Appl. Phys., 25, 3, p.388(1986)

(42) 佐藤・中野・加賀・赤上・岩泉・堀：「等価霧中法によるフラッシオーバ電圧の電圧上昇速度依存性」、放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-79-42,EIM-79-63、p.11(1979)

(43) 佐藤・加賀・赤上：「汚損沿面交流フラッシオーバ現象の基礎的研究」、秋田大学鉱山学部研究報告、2, p.43(1981)

(44) 佐藤・加賀・赤上：「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」、電気学会論文誌 A-104, 3, p.131（昭59）

(45) 電気学会：「がいしの人工汚損試験法について」、電気学会技術報告（Ⅰ部）第75号、p.23（昭41）

(46) 成田・赤上・佐藤・五十嵐：「がい子汚損面のＮａの分析」原研共同利用研究経過報告書、UTRCN-G-8, p.49(1978)

(47) 成田・赤上・佐藤・五十嵐：「がい子汚損面のＮａの分析」昭和54年度電気関係学会東北支部連合大会、No.1A15

(48) 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時の交流沿面アークの特性」昭和55年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2B8

(49) 佐藤・加賀・赤上：「方形モデル汚損帯における部分汚損時のフラッシオーバについて」、昭和60年電気学会全国大会、No.1049

(50) 佐藤・加賀・赤上：「方形モデル汚損帯における不平等汚損時の交流フラッシオーバ電圧特性」、昭和61年全国大会、No.1078

(51) 佐藤・中野・加賀・赤上・岩泉・堀：「等価霧中法によるフラッシオーバ電圧の電圧上昇速度依存性」、放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-79-42,EIM-79-63、p.11(1979)

(52) 加賀・佐藤・中野・赤上：「不平等汚損帯におけるフラッシオーバ電圧と電圧上昇速度」、昭和55年電気学会全国大会、No.1071

(53) 佐藤・加賀・赤上：「空間的にみた汚損がいしのフラッシオーバ機構」、昭和59年電気学会全国大会、No.1058

(54) 佐藤・斉藤・赤上：「台形状の汚損がいしモデルにおける交流フラッシオーバ特性」、昭和62年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2E12

(55) 佐藤・赤上・斉藤・橋本・佐藤(安)・小川・松田：「塩水の氷結状態によるがいしの交流フラッシオーバ特性」、昭和63年度電気学会全国大会、No.1020

(56) M.Sato, H.Saito, A.Kaga & H.Akagami:"Fundamental Characteristics of AC Flashover on Contaminated Insulators Covered with Ice", Jpn. J. Appl. Phys., 28,5,p.889(1989)

第２章　汚損がいし面上における交流再点弧特性

２．１　まえがき

屋外がいし表面の汚損層が霧や露によって湿潤すると漏れ電流が流れる[1]～[4]。この漏れ電流によって不均一に加熱されると、汚損層は局部的に乾燥して電界方向と直角に乾燥帯を形成する。この乾燥帯には高電界がかかるため、この部分で局部アーク放電が発生する。交流電圧においては、一般に局部アーク放電は通常１～数半波繰り返して消滅する。しかしながら、ある条件下では局部アーク放電が伸展を繰り返しながらついにはフラッシオーバに至ることがある。従って、汚損がいしのフラッシオーバ電圧は局部アーク放電の伸展特性すなわち電圧、電流特性に依存するものと考えられる。ところが、フラッシオーバへ移行する直前の局部アーク放電の電圧、電流特性を測定することはかなり困難である。これは、局部アーク放電からフラッシオーバへの移行が著しく速いためである。このため、従来のフラッシオーバ特性の解析には局部アーク放電特性の代わりに塩水ジェット表面[3]、空気中[1][2][5]、塩霧中[4]および電解質溶液面[6]におけるアーク放電の電圧、電流特性が用いられてきている。しかし、汚損沿面放電は著しく複雑な現象であるため、これらの努力にもかかわらずいまだに十分解明されていない。

著者は、ＮａＣｌで汚損した湿潤汚損面に５０Hz電圧を印加した場合の放電特性についていくつかの実験的ならびに解析的研究を行ってきた。その結果、＜１．２．２＞項で述べたように、アーク電圧

はアーク電流[7][8]、塩分付着密度[9]～[12]および気温[13]～[15]に依存することを明らかにした。また、半波毎に再点弧を繰り返す場合、各半波のアーク電圧は再点弧の繰り返し数の増加に伴って徐々に低下し、最低値を経て上昇することが分かった。また、これらの特性は汚損面から供給される電離電圧の低いＮａ原子の放電空間における挙動に基づくものと推測した[16]～[19]。

しかしながら、これらのアーク電圧特性は半波毎に繰り返して起こるフラッシオーバを通じて得られているため、実質的には各フラッシオーバ後の特性である。従って、これはフラッシオーバへ移行する直前の局部アーク放電の特性とは異なっている。自然条件下のフラッシオーバ特性を検討する上で、半波毎に繰り返す再点弧の電圧特性の方がこれまでの汚損沿面アーク特性より重要であるものとみられる。

そこで本章においてはまず、フラッシオーバ電圧特性の基礎となるこの再点弧電圧特性をアーク放電特性との関連に基づいて検討を行った[20]～[24]。

２．２　実験の概要

＜２．２．１＞ 実験装置

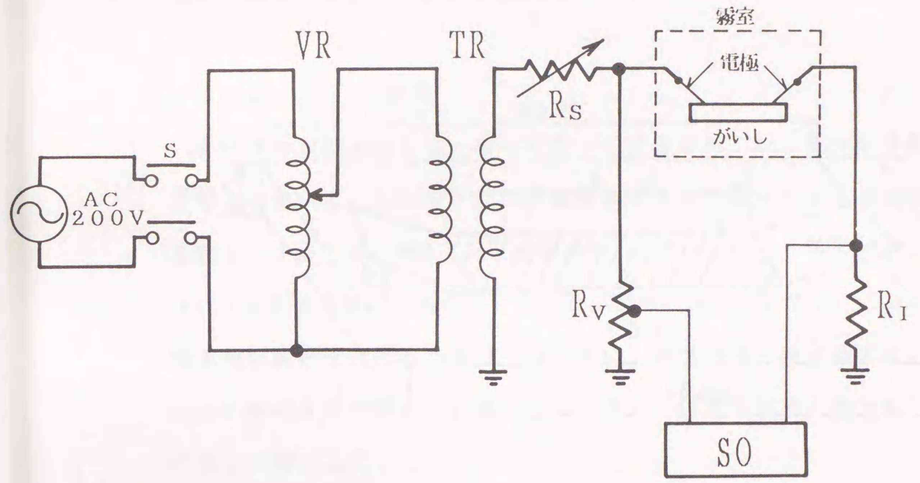
図２．１に、実験回路と装置の概略を示す。試験用変圧器ＴＲの定格は３０kVA、３０kV である。変圧器の％インピーダンス電圧は約６％である。Ｒｓはフラッシオーバ後のアーク電流調整用の抵抗である。電圧と電流は２要素のストレージオシロスコープＳＯで記録した。

図２．２に、がいし、汚損帯ならびに電極の配置を示す。がいしは磁器製で長さ１９cm、幅８cm、厚さ２cm である。電極は銅製で長さ５cm、厚さ０．０５cm で、幅は汚損帯の幅ｂと同一である。電極は同図に示すように、汚損面に対して３０° の角度で設置した。

＜２．２．２＞ 実験方法

実験はがいしの人工汚損試験法の一つである霧中法[25]に準じて行った。所定の乾燥汚損帯を作製したがいしを容積１．５m³（１×１×１．５m³）の霧室に搬入し、速やかに電極をセットする。直ちに所定の電圧を印加した後、加湿する。汚損層が湿ってくると局部アーク放電が発生し、印加電圧の半波毎に伸展して、ついにはフラッシオーバへ至る。その後は、印加電圧にもよるが、各半波において再点弧を繰り返す。本実験においては、再点弧後のアーク放電が汚損面から浮上しない２０半波程度の範囲内の電圧を測定した。電源電圧と制限抵抗を調整し、種々の値のアーク電流に対する放電電圧、すなわち放電特性を得た。

なお、加湿は１．５kW のヒータで水蒸気を発生させて行った。こ



VR：電圧調整器（２００V，３０A）　　Rv：分圧器
TR：変圧器（３０kV，３０kVA）　　RI：電流測定用無誘導抵抗
SO：ストレージ・オシロスコープ　　Rs：電流制限抵抗

図２．１　実験回路と装置の概要

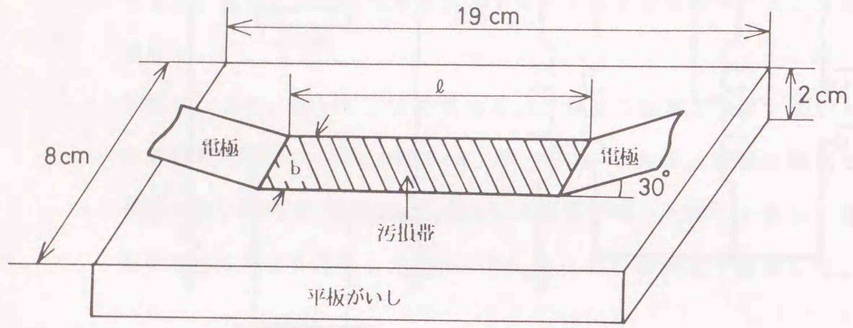


図2．2 汚損帯ならびに電極の配置

れにより、搬入後汚損帯が速やかに吸湿するように霧室は相対湿度（R.H.）をほぼ１００％に保った。これは、吸湿が遅いと局部アーク放電が間欠的となり、その結果汚損層が不均一になるからである。また、汚損帯の吸湿は大気とがいし面の温度差に依存する。そこで、霧室とがいしは共に試験前に３０℃一定に保った。

＜２．２．３＞ 汚損帯

自然条件下のがいしは一般に不均一に汚損され、かつ複雑な汚損分布をしている。しかし、ここでは簡単のために試料となる汚損帯を図２．３に示すように（ａ）全面汚損、（ｂ），（ｃ）部分汚損、（ｄ）全面非汚損の３通りとした。特に部分汚損については、（ｂ）電極間の両端を汚損した場合（以下単に、両端汚損と称する）と、（ｃ）両端を非汚損とした場合（以下単に、両端非汚損と称する）について検討した。

汚損液は、イオン交換水に溶解性固形分として食塩、また非溶解性固形分としてカオリン（主成分：SiO_2）を混入したものを用いた。汚損帯は、電極間を適当な領域に分け、各領域に一定量の汚損液を滴下し、これを３０℃のもとで乾燥させて作製した。この場合、所定の塩分（ＮａＣｌ）付着密度ｗ（mg/cm^2）となるように、汚損液中の食塩量を調整した。なお、本研究におけるカオリンの付着密度ｋはすべて０．１mg/cm^2 である。

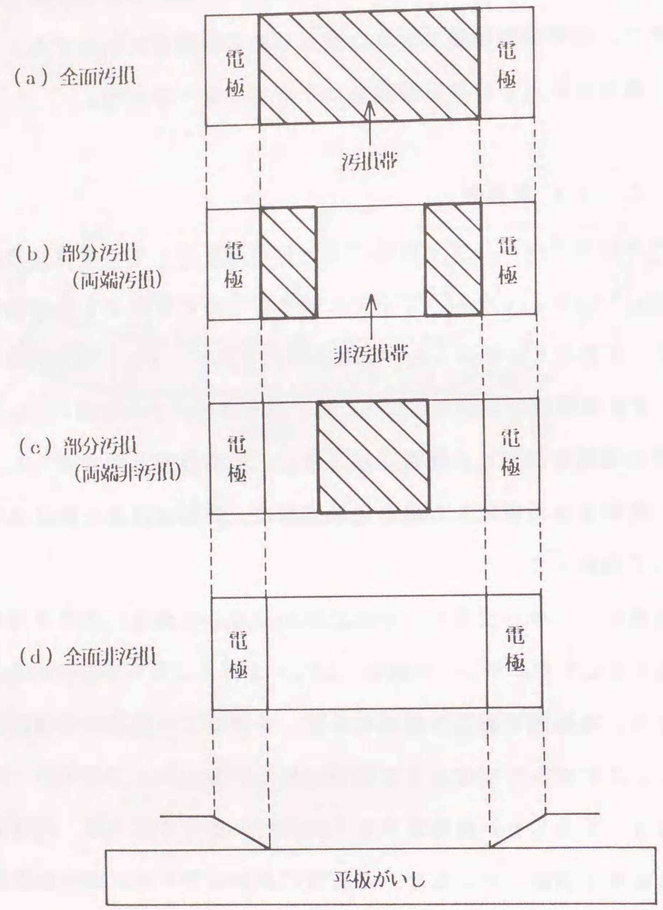
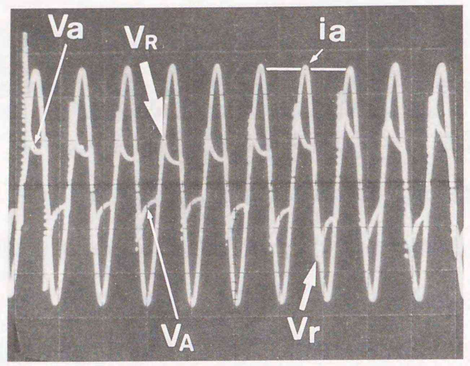


図2．3　供試汚損帯

2．3　再点弧電圧とアーク電圧の周期的変化

図2．4に、測定例として電極間距離 ℓ = 10cm、汚損幅 b = 1 cm および塩分付着密度 w = 0．5mg/cm^2 の全面汚損の場合の電圧、電流オシログラムについて示す。印加電圧は20kV であるが、これはこの汚損帯において再点弧が連続的に発生し得る下限の電圧である。印加電圧がこれより低いと最初のフラッシオーバの前に多数の局部アーク放電が発生するため汚損層の乾燥や減少が進み、フラッシオーバ後の連続的な再点弧が著しく困難となる。また、逆に印加電圧が高過ぎると、アークコラムに過大な電力が注入されることによりアークコラムが汚損面から浮上しがちになる。このため、測定電圧は著しく高くなり、得られた特性は汚損沿面におけるそれとはかなり異なったものになる。本章の各実験においては、以上の点に注意し、あらかじめフラッシオーバ電圧のばらつきが最も小さくなる印加電圧を求めて実験条件として採用した。

図2．4から分かるように、再点弧後のアーク電圧はアーク電流の増大に伴って再点弧電圧 V_r から急激に低下する垂下特性を示し、アーク電流の波高値 i_a に対応する電圧 V_a に達する。その後、アーク電圧は最低値を経てアーク電流の減少とともに上昇に転ずるが、ついにはアーク放電が消滅して次の半波へと移行する。このような一連の半波の繰り返しにおいて、再点弧電圧 V_r とアーク電圧 V_a は共に再点弧の繰り返し数（以下、単に再点弧数と呼ぶ）によって変化する。図2．4に示すように、一般に V_r と V_a は再点弧数の増加と共に徐々に低下し、ある半波において最低値 V_R と V_A となり、その後は上昇に転ずる。



w:0.5mg/cm²
ℓ:10cm, b:1cm
2kV/div, 0.2A/div, 20ms/div

V_r :再点弧電圧
V_R :V_r の最低値
V_a :アーク電圧
V_A :V_a の最低値
ia :アーク電流

図２．４　再点弧電圧V_rとアーク電圧V_aの周期的変化（全面汚損）

２．４　全面汚損時の再点弧電圧特性

＜２．４．１＞ 再点弧数ＮによるV_rとV_aの変化

図２．５に、再点弧電圧V_rとアーク電圧V_aの再点弧数Ｎに対する変化を示す。同図の例は汚損長ℓが１０cm、汚損幅ｂが１cm、塩分付着密度ｗが０．１mg/cm² の全面汚損で、アーク電流ｉａ（波高値）はそれぞれ０．２８A と０．６９A である。V_rとV_aは共にＮの増加に伴って初め低下し、それぞれの最低値V_RとV_Aを経て上昇に転じている。V_Rが生ずる再点弧数はV_Aのそれより一般にやや大きく、またアーク電流ｉａが大きくなるに伴って小さくなっている。更に、V_RとV_Aの値は同様にｉａが大きくなる程小さくなっている。

図２．６には塩分付着密度ｗに関する特性を示した。両図の例は共に汚損長ℓが１０cm であるが、（ａ）図は汚損幅ｂが１cm でアーク電流ｉａが０．５３A、（ｂ）図はｂが５cm でｉａが０．３３Aの例である。また、塩分付着密度ｗはそれぞれ０．１および０．５mg/cm² である。再点弧数Ｎに対するV_rとV_aの変化は図２．５の場合と同様である。最低値V_RとV_Aが生ずる再点弧数はｗに依存し、ｗが大になるに伴い増加していることが特徴的である。また、汚損幅ｂが大になると最低値V_RとV_Aが生ずる再点弧数が大になるように見うけられるが、この傾向はそれほど顕著ではない。

図２．７には、最低値V_Rが生ずる再点弧数をアーク電流ｉａに対して示した。（ａ）図の塩分付着密度ｗは０．０６mg/cm²、（ｂ）図のｗは０．１mg/cm² である。両図から、一般にｉａが大になる程少ない再点弧数で最低値V_Rが生ずることが分かる。また、ｉａが

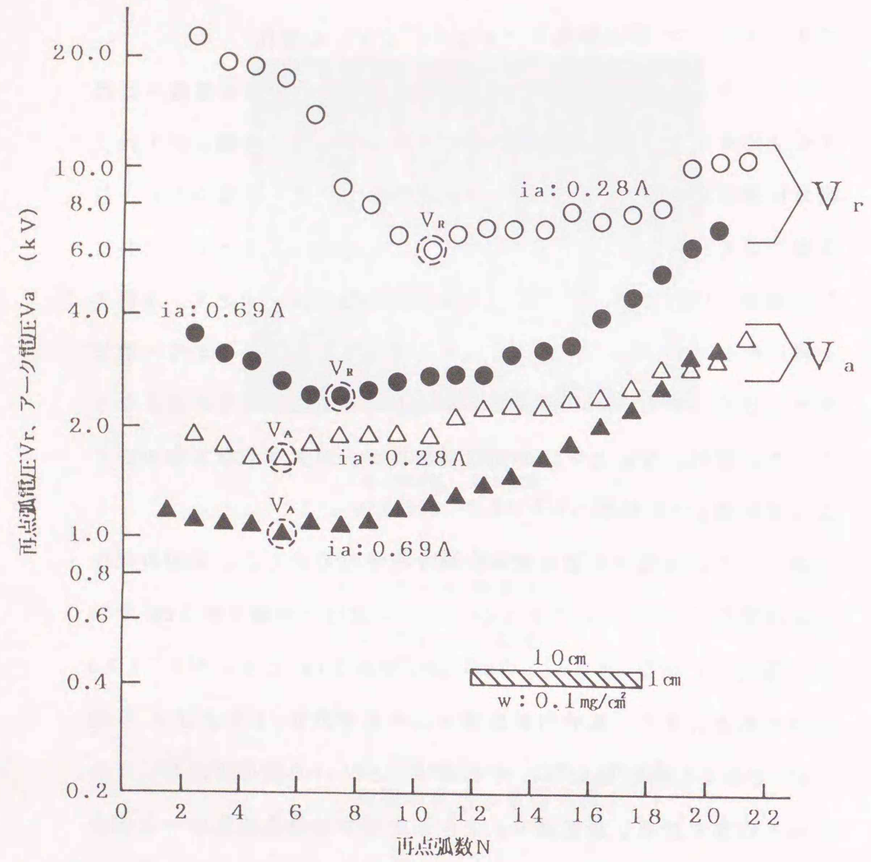
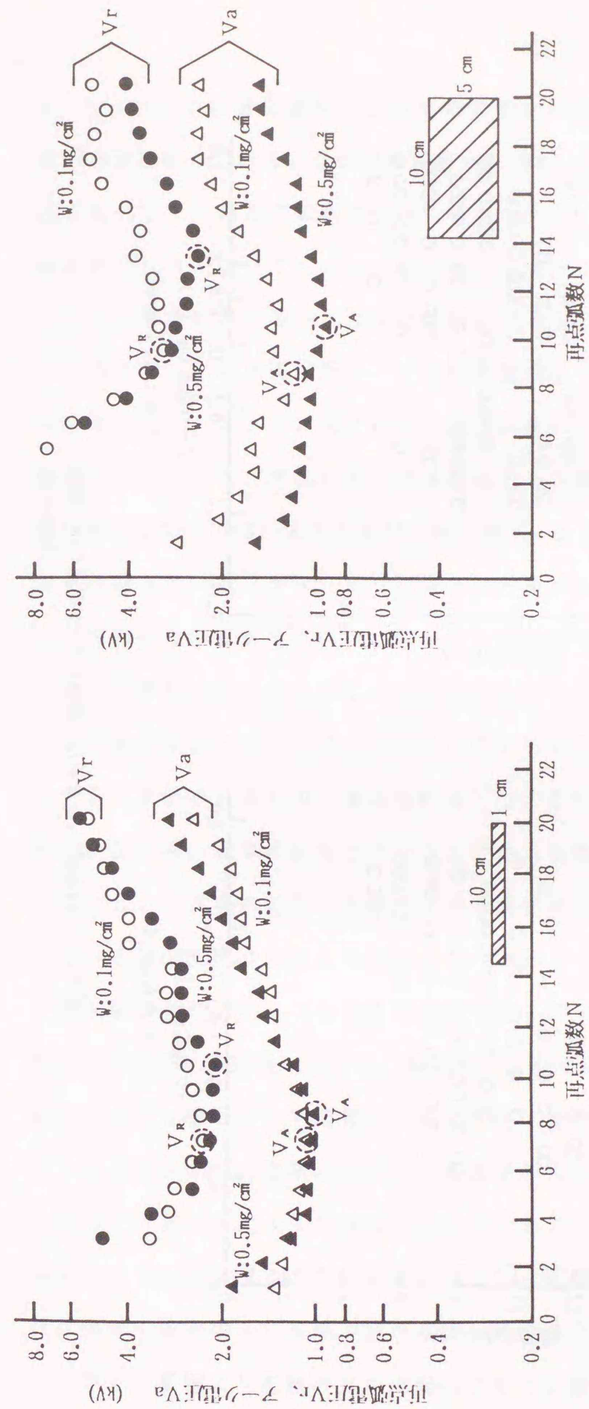


図2．5　再点弧数Nに対する再点弧電圧Vrとアーク電圧Vaの変化



(b) b：5cm, ia：0.33A

(a) b：1cm, ia：0.53A

図2．6　塩分付着密度wに関するVr－N特性およびVa－N特性

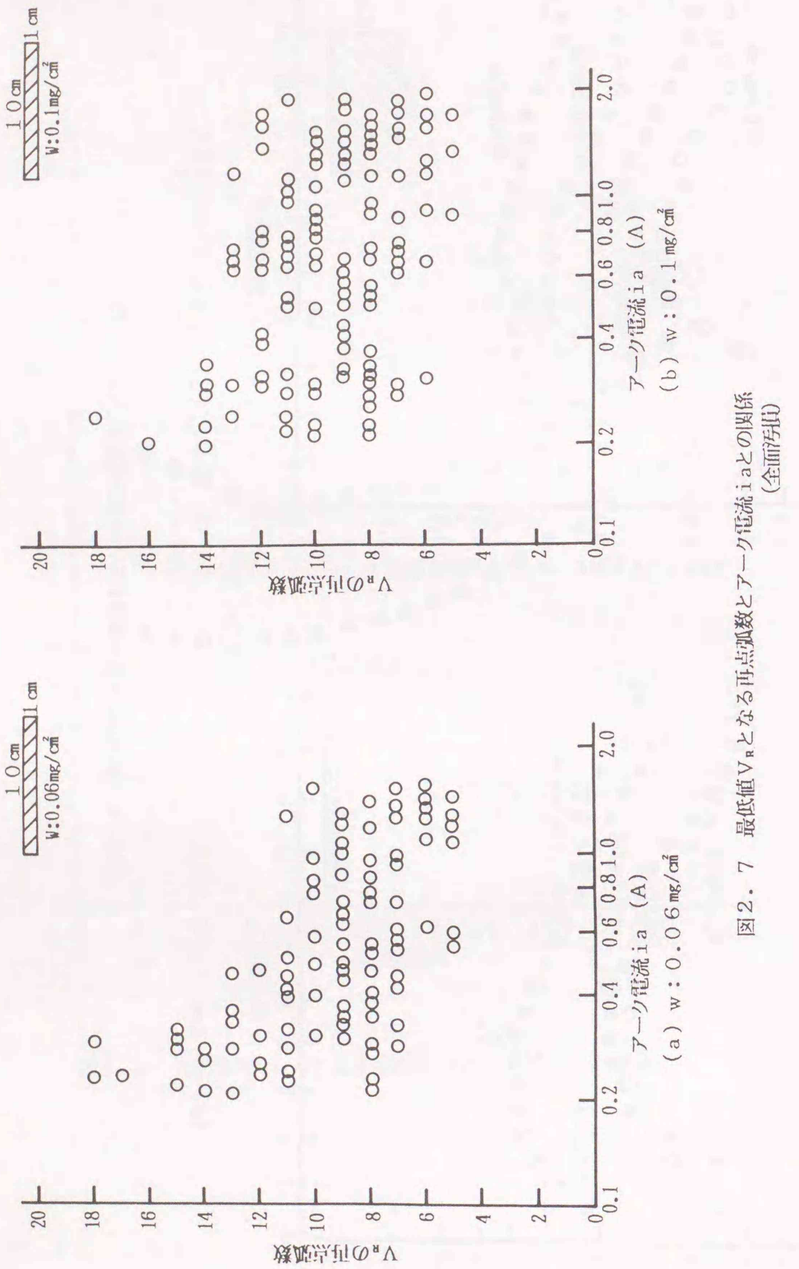


図２．７　最低値V_Rとなる再点弧数とアーク電流iaとの関係
(全面汚損)

０．３A 以下では最低値V_Rに達するためにはかなり数多くの再点弧が必要となっている。塩分付着密度wが低い（ａ）図の方が（ｂ）図に比べてV_Rの再点弧数のばらつきが小さく、またiａに対する依存性が大きくなっている。一般的には、５～１２波の再点弧数でV_Rが生ずるものが多いことが分かる。

このように、再点弧電圧V_rが再点弧数によって変化するという特性は、＜１．２．２＞項で述べた汚損沿面アークの特性と著しい類似を示している。すなわち、汚損沿面アーク電圧Ｖａは再点弧の繰り返しに伴って初め低下するが、極小値V_Aを経て上昇に転ずる。再点弧電圧V_rはフラッシオーバ電圧であるからアーク電圧Ｖａと全く同質のものであるとはいい難いが、共に放電空間中の気体の電離による導電に関連する量である。従って、V_rとＶａは空間中の気体の諸性質、ことに気体を構成する原子あるいは分子の電離電圧に大きく支配されるものと考えられる[26]。この点に関してはV_rとＶａとが強い類似性をもっていることからも推測できる。従って＜１．２．２＞項の結果に基づけば、上述の再点弧電圧V_rの特性については次のように考えられる。

再点弧とそれに続くアーク放電の繰り返しによって、電離電圧の低いＮａ原子が汚損面から蒸発、飛散することは容易に推測される。飛散したＮａ原子は、半波毎に放電空間内で累積と拡散を行いながら、ある時点でその空間における数密度が最大に達するものと考えられる[15]。これによって再点弧電圧V_rとアーク電圧Ｖａの最低値V_RとV_Aが生ずるのであろう。しかし、最低電圧に達した後は汚損面から蒸発するＮａ原子数が減少し始めるため、空間におけるＮａ原子の累積より拡散の方が支配的になる。従って、アークコラ

ムは拡散的に浮上するので、放電距離の増大も加わって再点弧電圧Ｖｒとアーク電圧Ｖａは上昇し始めるものと考えられる。

以上のように、本章における実験結果から、フラッシオーバ電圧である再点弧電圧Ｖｒは主としてその時点、すなわち再点弧直前の放電空間におけるＮａ原子の挙動に大きく支配されるという重要な示唆がなされた。

＜２．４．２＞ 全面非汚損時の特性との比較

図２．８に、再点弧電圧Ｖｒと再点弧数Ｎとの関係を、電極間の全面が汚損されている場合（全面汚損）と汚損されていない場合（全面非汚損）とを比較して示した。アーク電流ｉａはほぼ等しくそれぞれ０．５８Ａ、０．６３Ａである。また、両者とも電極間距離が１０㎝、電極幅が５㎝ および印加電圧が２６kV である。なお、全面汚損時の塩分付着密度は０．１mg/㎠である。

再点弧数Ｎに対する電圧Ｖｒの変化は、全面汚損時も全面非汚損時もほぼ同様である。しかし、最低値V_Rに達した後のＶｒの変化や、V_Rが発生する再点弧数に違いが見られる。すなわち、全面汚損時には最低値に達した後Ｖｒは上昇を続けるが、非汚損時には途中で上昇をやめてほぼ一定値となっている。また、全面汚損時の最低値V_Rは非汚損時に比べて大きな再点弧数で発生し、その値は著しく低い。更に、観察によると非汚損時のアークコラムが最初のフラッシオーバでがいし面から著しく浮上するのに対して、全面汚損時には浮上するまでにかなりの時間を要する。これは、Ｎａ原子の有無によってコラムに投入されるエネルギー量が異なり、アークコラムの温度に大きな差があるためと考えられる。これらのことから、

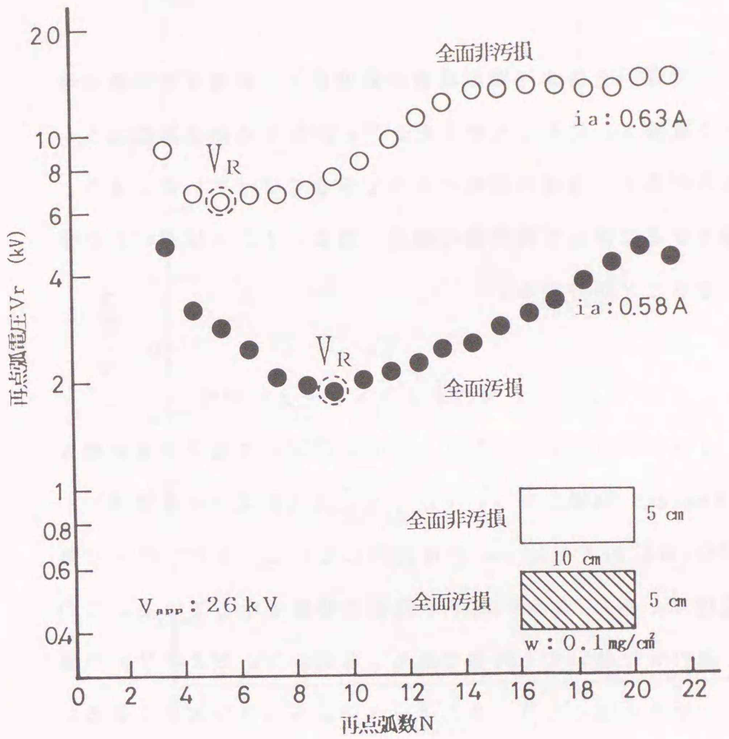


図２．８　全面汚損時と全面非汚損時との比較

再点弧電圧V_rに関する両者の差は、汚損の有無すなわち再点弧時の放電空間におけるNa原子の挙動に大きく関係しているものと考えられる。

図２．９には、全面非汚損の場合の最低値V_Rが発生する再点弧数をアーク電流iaに対して示した。V_Rが生ずる再点弧数は５～９波のものが多く、全面汚損時に比べて少なくなっている。また、iaが増大するに伴って汚損面の場合（図２．７）とは逆に再点弧数が大になることが分かる。

＜２．４．３＞ V_R－ia特性およびV_A－ia特性

図２．１０に、V_RおよびV_Aとiaとの関係を塩分付着密度wが０．０６mg/cm^{2}の場合について示した。再点弧電圧の最低値V_Rはiaが０．６A以下ではiaに反比例している。また、アーク電圧の最低値V_Aも０．３５A以下で同様な特性を示している。この特性は、他のwにおいても同様である。なお、V_RおよびV_Aの値はwが大になると低くなり、またデータのばらつきが大きくなる。

一方、図２．１１に全面非汚損時のV_R－ia特性およびV_A－ia特性を電極間距離ℓ＝３cmの場合について示す。この場合、V_RとV_Aはアーク電流のほぼ－０．７乗に比例している。この結果は、他の研究者による結果[1][2][6][27]とほぼ一致している。更に、データのばらつきは全面汚損時に比べて小さい。

図２．１０と図２．１１を比較すると、全面汚損時のV_R－ia特性およびV_A－ia特性は放電空間のNa原子の挙動に大きく依存しているものとみられる。すなわち、アーク電流iaが大になると拡散効果が大きくなってアークコラムは浮上しがちとなり、放電

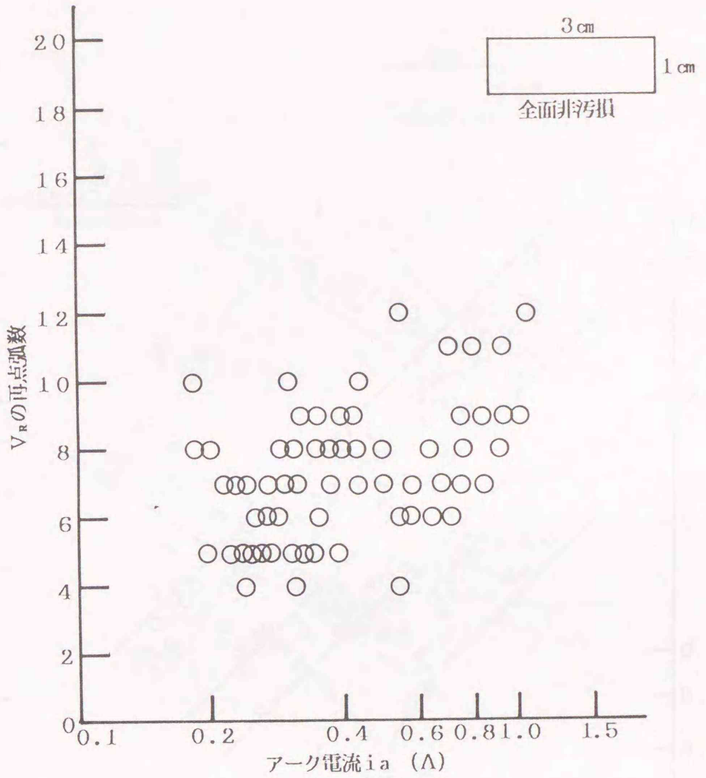


図２．９　最低値V_Rとなる再点弧数とアーク電流iaとの関係（全面非汚損）

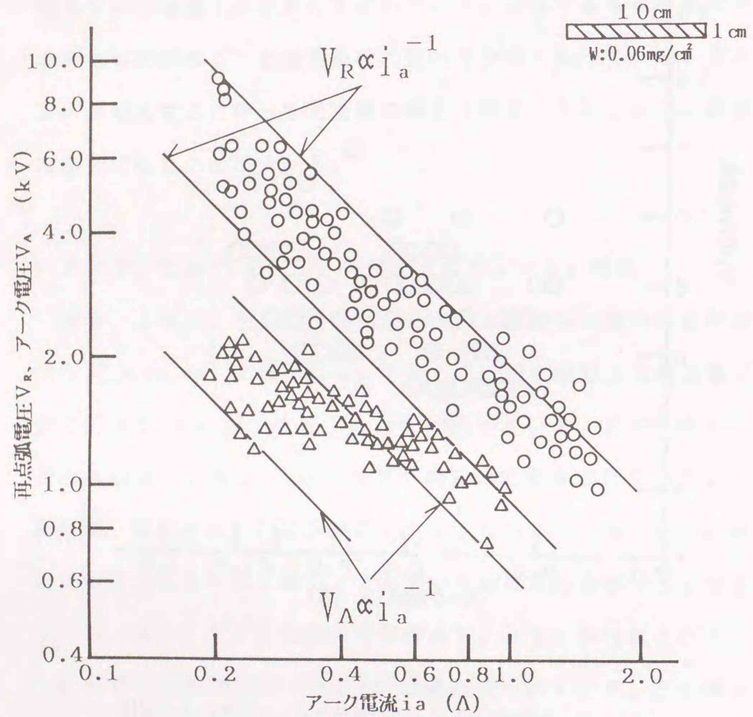


図2．10　全面汚損時のV_R－ia特性とV_Λ－ia特性

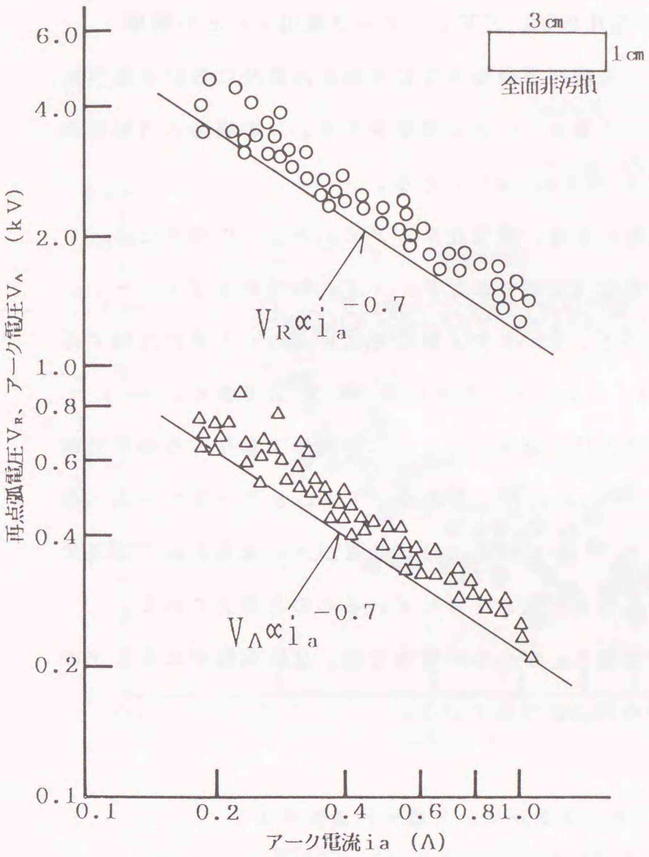


図2．11　全面非汚損時のV_R－ia特性とV_Λ－ia特性

電圧は高く、その放電の形態は全面非汚損時のそれに近づく。

＜２．４．４＞ 電圧比V_R／V_Aとアーク電流ｉａとの関係

図２．１２に、全面汚損時ならびに全面非汚損時における電圧比V_R／V_Aとアーク電流ｉａとの関係を示す。この場合の汚損面の塩分付着密度は０．０６mg/cm^{2}である。

全面汚損時においては、電圧比V_R／V_Aはｉａの増大に伴って低下している。電圧比は明らかにV_R－ｉａ特性およびV_A－ｉａ特性に依存している。V_RとV_Aがともにｉａの－１乗に比例する０．３A 以下では、V_R／V_Aの平均値は約３．７である。

一方、全面非汚損時の電圧比はｉａに無関係であり、その平均値は約５．５となっている。アーク電流が小さいとアークコラムへの注入電力量が小さく、半波間での冷却効果が大になるため、電圧比V_R／V_Aのばらつきが大きくなっているものと考えられる。

また、アーク電流ｉａが小さい場合には、全面汚損時の電圧比は全面非汚損時のそれに近づいている。

＜２．４．５＞ 再点弧電圧V_Rと塩分付着密度ｗ

以上検討してきたように、全面非汚損の場合の特性と比較すると、汚損面における再点弧電圧は放電空間におけるＮａ原子の挙動によって支配されていることが分かる。従って、汚損面の塩分付着密度ｗがV_Rに大きく影響するものと考えられる。そこで、図２．１３にアーク電流ｉａが０．３A におけるV_Rとｗとの関係を示す。V_Rは塩分付着密度の－１／５乗に比例しているものと見なすことができる。この特性は、＜１．２．２＞項で述べたアーク電圧V_Aの特

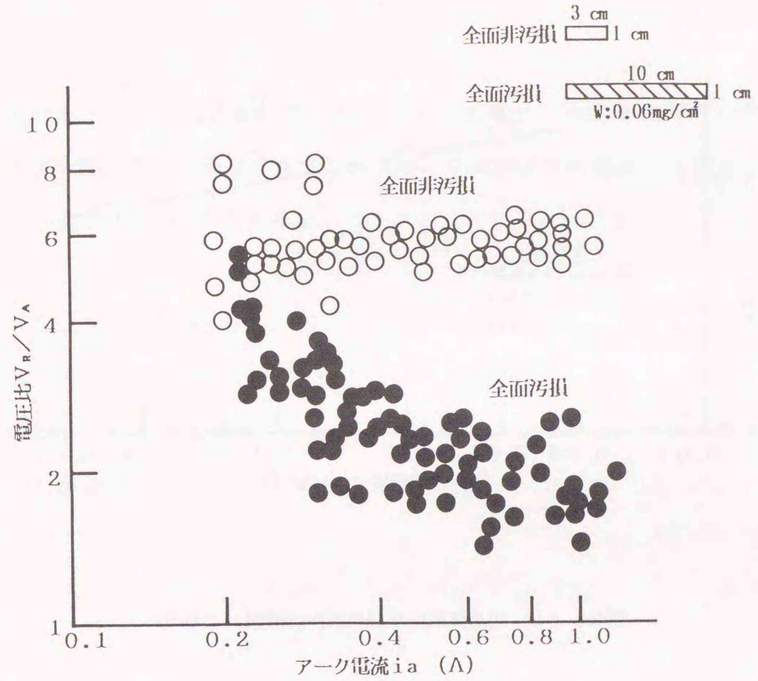


図２．１２ 電圧比V_R／V_Aとアーク電流ｉａとの関係

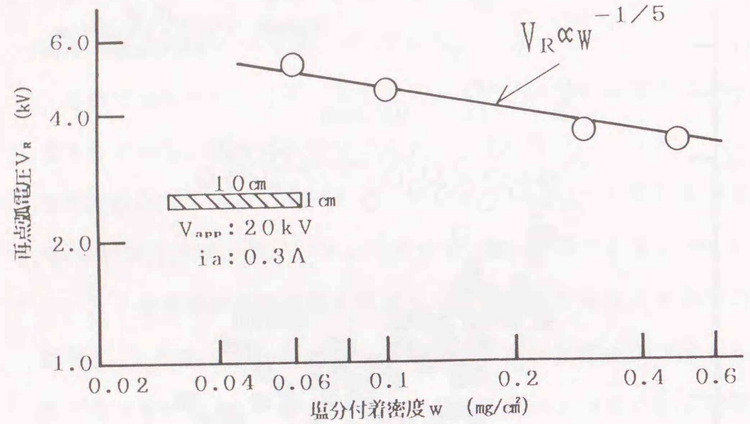


図２．１３　再点弧電圧V_Rと塩分付着密度wとの関係

性と同様である。すなわち、アーク電流が０．３５A 以下では、アーク電圧V_Aは次式で表される[19]。

$$V_A = 19\ell(wk^{1/3})^{-1/5} i_a^{-1} \quad (V) \quad \cdots\cdots\cdots (2.1)$$

いま、$V_R - i_a$ 特性および$V_R - w$特性から再点弧電圧V_Rをアーク電圧V_Aと同様な形式で表すと、次式のようになる。ただし、i_a は０．６A 以下である。

$$V_R = 70\ell(wk^{1/3})^{-1/5} i_a^{-1} \quad (V) \quad \cdots\cdots\cdots (2.2)$$

従って、再点弧電圧V_Rとアーク電圧V_Aとは密接な関係があることが分かった。

２．５　部分汚損時の再点弧電圧特性

前節までに、電極間の全面を均一に汚損した方形汚損帯を用いて再点弧電圧特性について検討した。しかし、実用がいし類は下面にひだや突起があるため、一般にその汚損分布は不平等であると考えられる[25]。そこで、本節では不平等汚損の代表例として電極間に汚損部分と非汚損部分がある場合（以下、部分汚損と称する）について前節と同様な検討を行った[23][24]。

＜２．５．１＞ 再点弧電圧の周期的変化

図２．１４に、再点弧電圧V_rの周期的変化の例を両端汚損と両端非汚損の二つのタイプの部分汚損について示す。汚損条件は両者とも全汚損長が７cm、非汚損長が３cm、電極間距離ℓが１０cm で、印加電圧V_{app}は２６kV である。いずれの場合も全面汚損時と同様に、V_rは再点弧の繰り返しに伴って最低値V_Rに達するまで減少し、その後上昇に転じている。両端汚損の場合のV_Rは、両端非汚損の場合のそれに比べて著しく低くなっている。

図２．１５に、全汚損長を図２．１４の７cm より短く６cm とした場合のV_rの周期的変化を示す。両端汚損の場合には図２．１４の場合に比べて最低値V_Rが生ずる再点弧数がやや小さくなり、またV_Rの値は高くなっている。これは、両端の汚損長が短いほど付着塩分量が少ないため、汚損面からのＮａ原子の蒸発・飛散量が小さくなるためと考えられる。

一方、両端非汚損の場合はV_Rの値およびそれが生ずる再点弧数は汚損長が長い図２．１４の場合とほぼ同一である。両端非汚損の

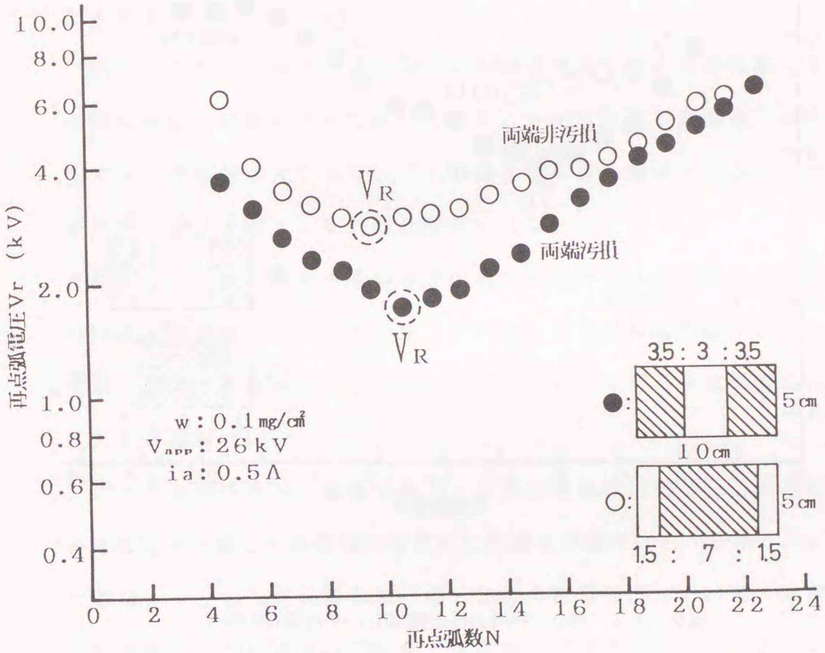


図２．１４　部分汚損時の再点弧電圧Vrの周期的変化
（汚損長７cmの場合）

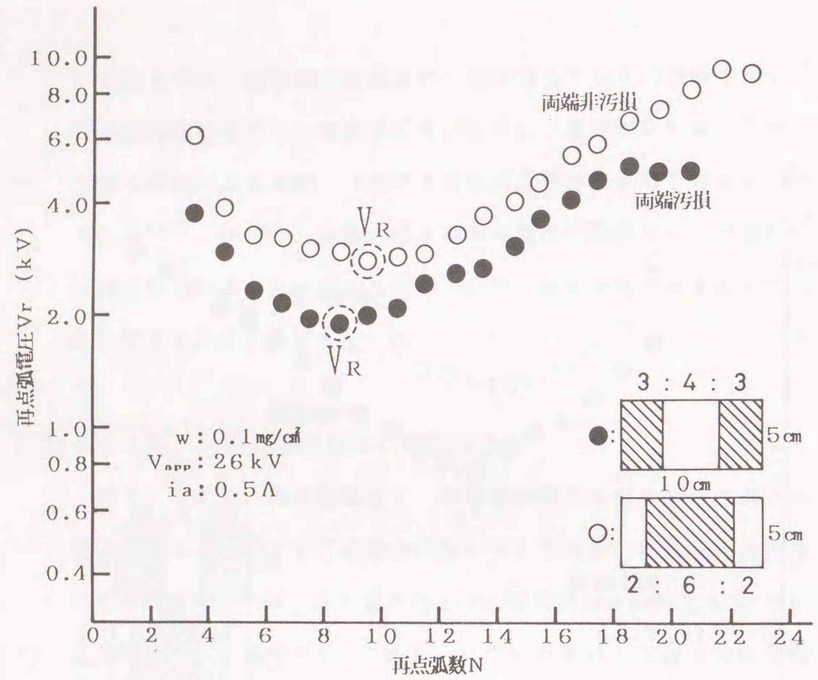


図2．15　部分汚損時の再点弧電圧Vrの周期的変化
（汚損長6cmの場合）

場合には、非汚損部分の電界が高いためフラッシオーバ前に多数の局部アーク放電が間欠的に発生する。従って、フラッシオーバ時の付着塩分量が著しく減少し、放電空間におけるNa原子の拡散が早く累積が小さいため、両端汚損時に比べて最低値V_Rが高くなるものと考えられる。

図2．16に、両端汚損の場合の再点弧電圧V_rと再点弧数Nとの関係を塩分付着密度wに対して示す。wが大なほど最低値V_Rが生ずる再点弧数が大であり、V_Rの値も低くなる傾向にあるが、全面汚損の場合（図2．6）ほど明確ではない。

図2．17に、両端汚損の場合の再点弧電圧V_rと再点弧数Nとの関係を汚損幅bに対して示す。bが大になると最低電圧V_Rはわずかに低下する傾向がみられるものの、それが生ずる再点弧数にはほとんど差がない。

以上の各特性から、電極間両端の汚損の有無や汚損部分の長さが再点弧電圧の値とその周期的な変化に影響を及ぼすことが分かった。これは、主として再点弧の繰り返しに伴う放電空間におけるNa原子の挙動、とりわけその累積量と拡散量に関係するものと考えられる[12][13][20][22]。

＜2．5．2＞ $V_R - i_a$ 特性

図2．18に両端汚損モデルの再点弧電圧の最低値V_Rとアーク電流i_aとの関係を示す。データはばらついているが、図中の実線のようにV_Rはi_aの－1乗に比例している。i_aが0.6Aを越えると、電圧のばらつきは大きくなっている。＜1．2．2＞項で述べたように、アーク電流が大きくなるとアークコラムの直径が大

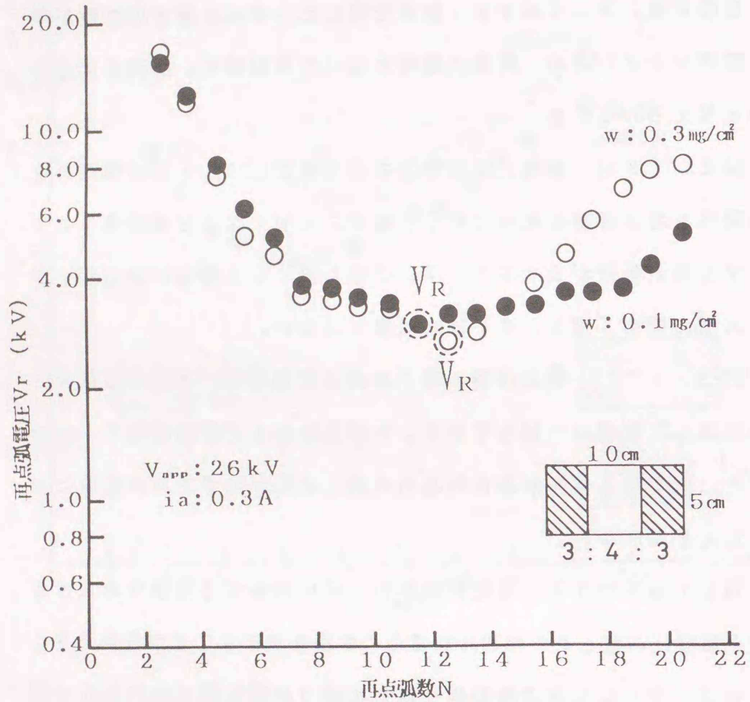


図2．16　塩分付着密度wによる再点弧電圧Vrの周期的変化

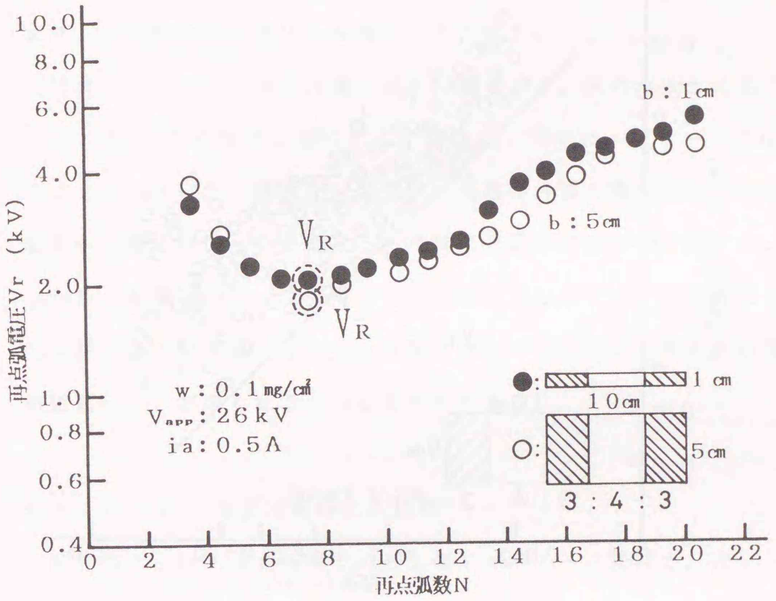


図2．17　汚損幅bによる再点弧電圧Vrの周期的変化

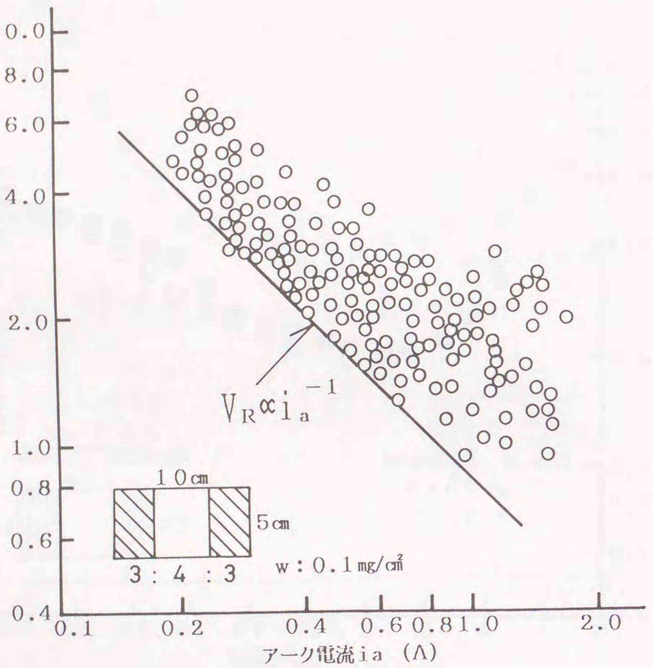


図2．18　両端汚損時のV_R－ia特性

になり、アークコラム中のＮａ原子の数密度が減少するものと考えられる。更にアーク電流が大になると、より大きな電力がアークコラム内に注入されてコラム温度は上昇する。その結果アークコラムは汚損面から浮上し、それに伴って汚損面近傍の電離雰囲気は拡散的に失われることになる。このため次半波の再点弧電圧V_rが高くなり、結果的に最低値V_Rも高くなるのであろう。

図２．１９に、両端非汚損の場合の例を示す。両端汚損と同様に$V_R \propto i_a^{-1}$なる傾向が見られる。図２．１８に比べてデータのばらつきは小さいが、電圧V_Rは高い。両端非汚損の場合には非汚損部分が高電界によって橋絡すると同時に放電が汚損面を伸展する。しかし、電極間のアーク放電の中央部は浮上しやすく、汚損面上の中央部にあるＮａ原子を十分に蒸発させないうちに浮上するため再点弧電圧V_Rが高くなるものと考えられる。

＜２．５．３＞ 全面汚損時との比較

前述のように、再点弧電圧の最低値V_Rがアーク電流ｉａの－１乗に比例するため、V_Rとｉａの積は一定である。表２．１に、全面汚損時と部分汚損時のV_Rとｉａの積の平均値$\langle V_R\ i_a \rangle$を示した。r_vは全面汚損時に対する$\langle V_R\ i_a \rangle$の比率であり、σ／ｍ（％）はデータのばらつきを示している。

両端汚損時の$\langle V_R\ i_a \rangle$の値は全面汚損時とほぼ等しいか、あるいはむしろ低くなっている。これは、電極間中央にある非汚損部分が放電電流を制限し、この電流制限効果が局部アーク放電による汚損層の飛散を抑えているためであろう。すなわち、汚損層においてフラッシオーバ前に発生する局部アーク放電や小さなシンチレーショ

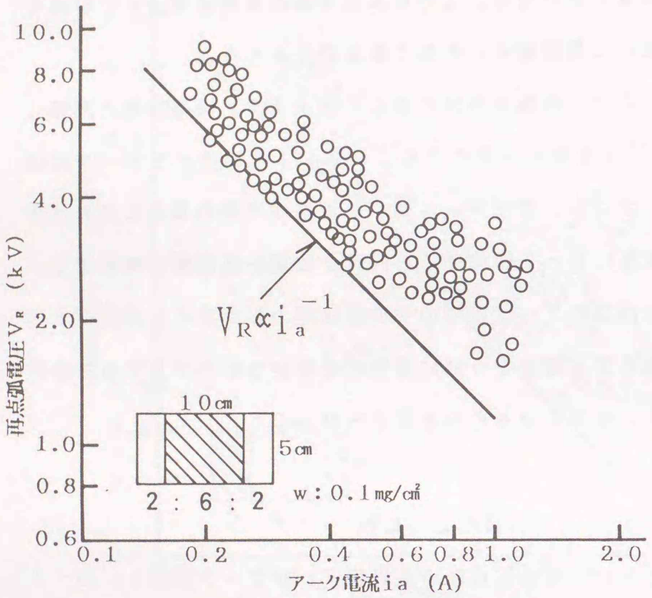


図2．19　両端非汚損時の$V_R - ia$特性

表2．1　全面汚損時および部分汚損時の$\langle V_R i_a \rangle$値

汚損帯＼諸量		$\langle V_R i_a \rangle$ (VA)	r_V	σ/m (%)
全面汚損		1,290	1	17.0
両端汚損	3 : 4 : 3	1,330	1.03	15.8
	3.5 : 3 : 3.5	1,105	0.86	17.2
両端非汚損	1 : 8 : 1	1,950	1.51	24.4
	1.5 : 7 : 1.5	1,890	1.46	22.7
	2 : 6 : 2	1,580	1.22	28.9

ン放電は塩分付着密度を減少させるのみで、フラッシオーバ時の放電空間でのＮａ原子数密度の増大にはあまり関係していないものと考えられる。従って、両端汚損時には汚損層の飛散が抑えられることにより、汚損面からのＮａ原子は結果的に有効に放電空間内に累積されているものと考えられる。しかし、r_v に関してみると、非汚損部の長さが３cm の場合に０．８６であるのに対して４cm の場合には１．０３ と高くなっていることは、やはり全体的にはＮａ原子数密度が汚損長の増大によって大きくなったことを意味しているものと考えられる。従って、中央に非汚損部を設けた場合の再点弧電圧が全面汚損時よりも低くなる場合がありうるであろう。また、中央の非汚損部の長さが表２．１に示した長さ3cm に比べて大かあるいは小である場合には、電圧V_R は高くなるであろう[19]。このような観点から見ると、両端汚損時の$\langle V_R\ i_a \rangle$の値が全面汚損時のそれと等しくなる汚損長は、電極間距離の６０～７０％であると考えられる。ちなみに、フラッシオーバ前の局部アーク放電の臨界伸展長は電極間距離の５７％であるという報告がある[2]。

次に、両端非汚損時の場合は、全ての汚損条件で$\langle V_R\ i_a \rangle$の値は全面汚損時のそれより高く、ばらつきも大きい。このような汚損条件下では、局部アーク放電は高電界によって両端の非汚損部で交互に発生し、汚損部の端部の汚損度を低下させ汚損長を減少させる。これによってフラッシオーバ時の放電空間内のＮａ原子数密度が減少し、結果的に再点弧電圧が上昇するものと考えられる。また、両端の非汚損部が短くなるに伴ってr_v は大きくなっている。すなわち、この程度の長さの非汚損部の場合には、その長さが短いほどフラッシオーバ前に発生する局部アーク放電あるいはシンチレーショ

ン放電が頻発する。しかし、それによって汚損面から蒸発・飛散するＮａ原子が有効に放電空間に累積されない。このため非汚損部が短くなるに伴ってr_v が大きくなっているものと考えられる。

以上述べたすべての特性において、再点弧電圧は電極間の両端にどの程度の汚損部分があるかに大きく依存している。従って、汚損がいし面のフラッシオーバ電圧は、局部アーク放電のアークスポット周辺の汚損条件によって著しく影響されるものと考えられる。

図２．２０に両端汚損モデルの再点弧電圧V_R と塩分付着密度ｗとの関係を示す。汚損部と非汚損部の長さの比は３：４：３である。先に報告したアーク電圧[12]と同様に、V_R もまたｗの－１／５乗に比例する。いま、この結果を図２．１８と表２．１の結果に関連して検討すると、汚損部の長さが電極間距離の約６０％の場合の両端汚損時の最低値V_R は、i_a ＜０．６A において次のような実験式で表される。

$$V_R = 70\,\ell\,(w k^{1/8})^{-1/5} i_a^{-1} \quad (V) \quad \cdots\cdots\cdots (２．３)$$

これは、＜２．４．５＞項で示したように、全面汚損時の実験式（２．２）式と同一である。

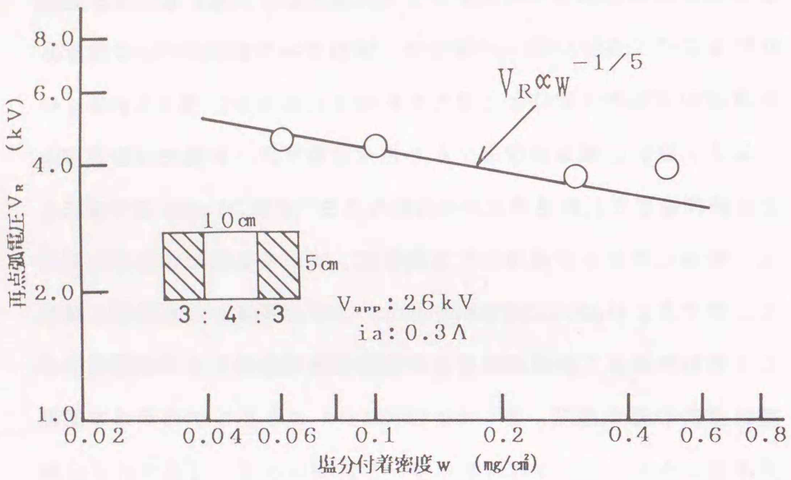


図2．20　両端汚損時のV_R－w特性

2．6　まとめ

ＮａＣｌで汚損したがいし面に５０Hzの交流電圧を印加した場合のフラッシオーバ現象について検討を行った。各半波における再点弧電圧およびアーク電圧に関して得られた実験結果を以下に述べる。

初めに、電極間を方形状に全面汚損した場合の結果を全面非汚損の場合のそれと比較し、汚損フラッシオーバに関していくつかの興味ある現象を見いだした。それらを摘記すると次のようになる。

（１）全面汚損時および全面非汚損時において、再点弧電圧V_rとアーク電圧V_aはいずれも再点弧数Ｎの増大に伴って徐々に低下し、最低値を経て上昇に転ずるＶ字形の特性を示す。

（２）V_rの最低値V_Rが生ずる再点弧数は、V_aの最低値V_Aが生ずる再点弧数より一般にやや大きい。

（３）全面汚損時においては、最低値V_Rが発生する再点弧数は一般にアーク電流ｉａが大になるに伴って小さくなる。これに対して、全面非汚損時においてはこれと逆の傾向を示す。

（４）汚損面においては、塩分付着密度ｗが大きくなるに伴って最低値V_Fが生ずる再点弧数は大になるように見受けられる。

（５）全面汚損時における再点弧電圧の最低値V_Rは、全面非汚損時に比べて大きな再点弧数で生じ、その値は著しく低い。

（６）汚損面においては、最低値V_RとV_Aはアーク電流ｉａの－１乗に比例する。この関係が成り立つｉａの範囲は、V_Rに関しては０.６A 以下であり、V_Aでは０.３５A 以下である。すなわち、この範囲内ではV_Rとｉａとの積の平均値$<V_R\ i_a>$およびV_Aとｉａとの積の平均値$<V_A\ i_a>$はそれぞれ一定値となる。

（７）全面非汚損の場合には汚損面の場合ほどデータはばらつかない。しかし、最低値V_R、V_Aは共に汚損面の場合より著しく高い。最低値V_RとV_Aはアーク電流ｉａの約－０．７乗に比例する。この結果は、他の研究者による値とよく一致している。すなわち、V_RはV_Aと同様な特性をもっていることを確認できた。

（８）汚損面における電圧比V_R／V_Aの平均値は、アーク電流ｉａが０．３５Ａ以下で３．７である。ｉａが０．２Ａ近くにおいては、電圧比は全面非汚損時の値に近づく。全面非汚損時の電圧比は５．５であり、ｉａの大きさには無関係で一定である。

（９）汚損面における最低値V_Rは塩分付着密度ｗの－１／５乗に比例している。この特性は、アーク電圧の最低値V_Aおよび汚損がいしにおけるフラッシオーバ電圧の塩分付着密度依存性と一致している。

更に、部分汚損時の再点弧電圧についても同様な検討を行った。その結果をまとめると、次のようになる。

（10）部分汚損時の再点弧電圧V_rの周期的変化は全面汚損時のそれとほぼ同様である。この場合の最低値V_Rもアーク電流ｉａの－１乗に比例する。従って、全面汚損の場合と同様に両者の積の平均値$<V_R\ i_a>$によってその特性の比較を行うことができる。

（11）最低値V_Rとアーク電流ｉａの積の平均値$<V_R\ i_a>$は電極間の両端の汚損の有無に大きく依存する。すなわち、両端非汚損時の$<V_R\ i_a>$値は全面汚損時に比べてかなり高い。これに対して両端汚損時には全面汚損と同等か、むしろ低い場合がある。これは、従来アーク電圧に関して得られた特性と類似している。

（12）全面汚損時、および汚損部が電極間距離の約６０％の場合

の両端汚損時の最低値V_Rを、$i_a < 0.6A$において次の実験式で表すことができた。

$$V_R = 70\ell(w k^{1/3})^{-1.5} i_a^{-1} \quad (V)$$

本章において検討した汚損がいし面上の再点弧電圧およびアーク電圧は、互いに密接な関係をもっている。従って、本章で得られた結果は次章以降において汚損がいしのフラッシオーバ特性を検討する上での基礎となっている。

参考文献

（１） F.Obenaus, D.Beyer und D.Bahrs,"Ueber den Fremdschichtwiderstand und die U-I-Kennlinie des Vorlichtbogens beim Kriechueberschlag", Wiss Z. Hochsch. Elektrotech Ilmenau, 5, s.31(1959)

（２） L.L.Alston & S.Zoledziowski,"Growth of discharges on polluted insulation", Proc.IEE, 110, 7, p.1260(1963)

（３） B.F.Hampton,"Flashover mechanism of polluted insulation", Proc.IEE, 111, 5, p.985(1964)

（４） H.H.Woodson & A.J.McElroy,"Insulators with Contaminated Surfaces,Part Ⅱ:Modeling of Discharge Mechanisms", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89, 8, p.1958(1970)

（５） O.Mayer,"Beitrag zur Theorie des statischen und der dynamischen Lichtbogens" Archv. fur Elektrotechnik, Bd.37, 12, s.588(1943)

（６） R.Wilkins and A.A.J.Al-Baghdadi,"Arc Propagation along an electrolyte surface", Proc.IEE, 118, 12, p.1886(1964)

（７） 加賀・佐藤・斉藤・赤上：「課電吸湿汚損面上の交流アークの始動特性」、昭和50年電気学会全国大会、No.1239

（８） 加賀・朝野・赤上：「汚損がいしの交流アーク特性のバラツキについて」、昭和50年度電気関係学会東北支部連合大会、No.1C-11

（９） 加賀・佐藤・赤上・朝野：「交流汚損沿面アーク特性の機構について」、昭和51年電気学会全国大会、No.1012

（10） 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの塩分付着密度依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D14

（11） 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時の交流沿面アークの特性」昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2B8

（12） 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの特性（塩分付着密度依存性）」、電気学会論文誌 B-98, 5, p.425(昭53)

（13） 赤上・加賀・佐藤：「汚損がいしのフラッシオーバ電圧の温度依存性」、昭和50年度電気関係学会東北支部連合大会、No.1C-12

（14） 加賀・佐藤・朝野・赤上：「交流汚損沿面アークの気温依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D12

（15） 加賀・佐藤・赤上：「汚損がいしのフラッシオーバ電圧の気温依存性」、電気学会論文誌 B-98, 5, p.433(昭53)

（16） 佐藤・加賀・赤上：「汚損がいし類の交流アークの特性」、電気学会放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-81-32,EIM-81-49, P.31(1981)

（17） 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面交流フラッシオーバ電圧特性」、昭和58年電気学会全国大会、No.1065

（18） 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面および沿面フラッシオーバ時の電圧・電流特性」、昭和59年電気学会全国大会、No.1057

(19) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Study of Characteristics of AC Arc Dischars on Polluted Insulator Surfaces", Jpn. J. Appl. Phys., 21, 4, p.574(1982)

(20) 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面交流アーク電圧とフラッシオーバ電圧との関係」、電気学会放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-83-44,EIM-83-54, P.75(1983)

(21) 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時における再点弧電圧とアーク電圧との関係」、昭和58年度電気学会東北支部連合大会、No.2E10

(22) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Reignition Voltage and Arc Voltage on Contaminated Insulator Surfaces",Jpn. J. Appl. Phys., 23, 8, p.1094(1984)

(23) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reigniting Discharge Characteristics on Contaminated Insulator Surface", Annual Report of CEIDP, No.IV-8, Claymont,DE,USA p.246(1984)

(24) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reignition Voltage on Partially Contaminated Insulator Surfaces", Jpn. J. Appl. Phys., 25, 3, p.388(1986)

(25) 電気学会：「がいしの人工汚損試験法について」、電気学会技術報告（Ⅰ部）第75号、p.23(昭41)

(26) 坂本・田頭：「新高電圧工学」、p.48,(昭49)朝倉書店

(27) K.H.Yoon & H.E.Spindle,"A Study of the Dynamic Responce of Arcs in Various Gases", AIEE Trans.77 PartⅢ, p.1634(1959)

第３章　方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係

３．１　まえがき

我が国における代表的ながいしの人工汚損試験法の一つに等価霧中法[1][2]がある。この試験法は、電圧の印加方法として電圧上昇法を用いている。すなわち、本法は供試がいしの表面漏れ抵抗が飽和するまで汚損液をスプレーし、原則としてスプレー後の３分後にフラッシオーバ電圧より十分低い電圧を加え、一定の割合でこれを上昇し、フラッシオーバ時にその値を記録するものである。

ここで特記すべきことは、電圧印加後フラッシオーバまでの経過時間によってフラッシオーバ電圧が変動するので、フラッシオーバまでの時間を１０～３０秒程度にするのが望ましい[2]とされている点である。これは印加電圧の初期値のほかに、その上昇率がフラッシオーバ電圧に影響を与えることを暗に含んでいるものと考えられる。これを一層強く示唆するものとしては、電圧の上昇速度がフラッシオーバに影響するから留意する必要があるという報告[3]がある。さらに、Fujitaka氏ら[4]は、二つの上昇速度（３および１０kV/s）でフラッシオーバ電圧の最低値と変動係数に関して比較を行っている。

このように、上昇法においてはその上昇率が重要な要素であるという報告があるにもかかわらず、文献（２）JEC-170(1978) には電圧上昇率について何らの規定がない。また文献（１）では一応の目

安として約７kV/s という値が推奨されている。しかし、各所における電源設備はまちまちであることから、一般に上昇率はこれらの値とは異なった適宜の値で行っているものと考えられる。このような事情から、前述のような Fujitaka氏らの研究のほかに、更に上昇率とフラッシオーバ電圧の関係に関するデータを積み重ねる必要があるものと考えられる。

そこで本章では、各種人工汚損試験法の中でも最低フラッシオーバ電圧が得やすいとされている等価霧中法において、印加電圧の上昇率が特に最低フラッシオーバ電圧に及ぼす影響について検討を行った[5]~[7]。実験は実用がいしの複雑な形状を避けるため、平板がいし面上に作製した方形状のモデル汚損帯を用いて行った。

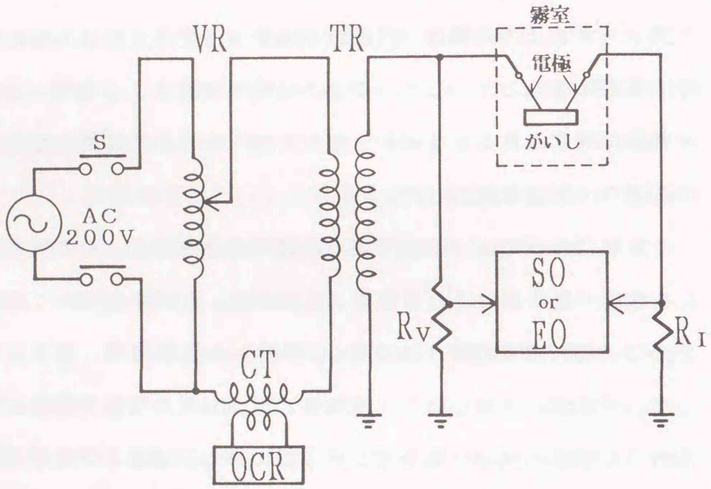
なお、「電圧上昇率」については、文献（３）では「上昇速度」、文献（４）では ”voltage raising speed （電圧を上昇させる速度）”としているが、本論文では文献（１）および文献（２）における電圧上昇法の規定に従い「電圧上昇率」、あるいは単に「上昇率」と呼ぶことにする。

３．２　実験方法

実験は図３．１に示す装置により行った。初めに、３０℃に保温した長さ１９cm、幅８cm、厚さ２cm の平板がいしを、２５０mm標準懸垂がいし（２５０Ｓ）上面を大略模擬するため水平面上３０度の角度に設置し、これに所定の濃度の汚損液を全面が飽和するまでスプレーする。この場合、汚損液の流動は汚損帯作製後の電極間方向に垂直になるようにしている。３分間の放置後、そのがいし面の中央部に所定の長さℓ（cm）、幅ｂ（cm）の方形汚損帯となるように周辺の汚損液を除去した。

本実験においては、試料である液膜の蒸発を防ぎ、その厚さをできるだけ一定に保つようにした。このため、試料をあらかじめ気温３０℃、相対湿度ほぼ１００％ に保持した実験槽内に水平に設置した。汚損液の移動を防ぎ、汚損帯とがいし面の接触を確実にするため、汚損帯の両端に電極をがいし面に対してほぼ３０度の角度で接触させる。なお、汚損帯の幅と電極の幅は同一にした。この後、直ちに電圧を柱上変圧器ＴＲ（７．５kVA、６．９kV）に接続した電圧調整器ＶＲ（２００V、３０A）により手動で零から一定の上昇率で連続的に上昇させ、フラッシオーバ時にその値を記録する。なお、実験装置の制約によって、今回は電圧上昇率を３０kV/s 以上にすることはできなかった。

フラッシオーバ電圧および電流は、２要素のストレージ・オシロスコープＳＯによって同時に記録し、さらにその各オシログラムから電圧上昇率Ｂならびにフラッシオーバ前までの局部アーク放電発生波数Ｎを測定した。フラッシオーバ電圧は実効値に換算して整理



VR：電圧調整器（200V，30A）
TR：変圧器（6.9kV，7.5kVA）
CT：変流器
OCR：過電流継電器

Rv ：分圧器
R_I ：電流測定用無誘導抵抗
EO：電磁オシログラフ（2kHz）
SO：ストレージ・オシロスコープ（2MHz）

図3．1　実験装置の概要

した。

なお、試験電源の短絡電流は15Aであり、フラッシオーバ直前の最大電流は1～2Aであるので、前章の図2．1とは異なり電源回路には直列抵抗を挿入していない。また、フラッシオーバ後は過電流継電器OCRを介して数Hzで回路を遮断した。

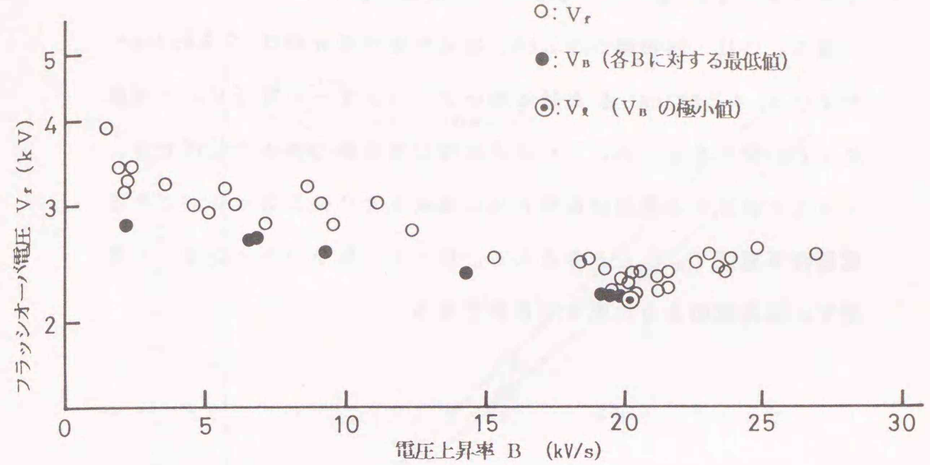
汚損液はイオン交換水1ℓに溶解性固形分として食塩を用い、その濃度を変えて所定の塩分（NaCl）付着密度w（mg/cm²）となるように調整した。また、非溶解性固形分として40g/ℓの濃度のカオリンを用いた。この場合のカオリン付着密度kはほぼ0．1mg/cm² に相当する。

3．3　フラッシオーバ電圧

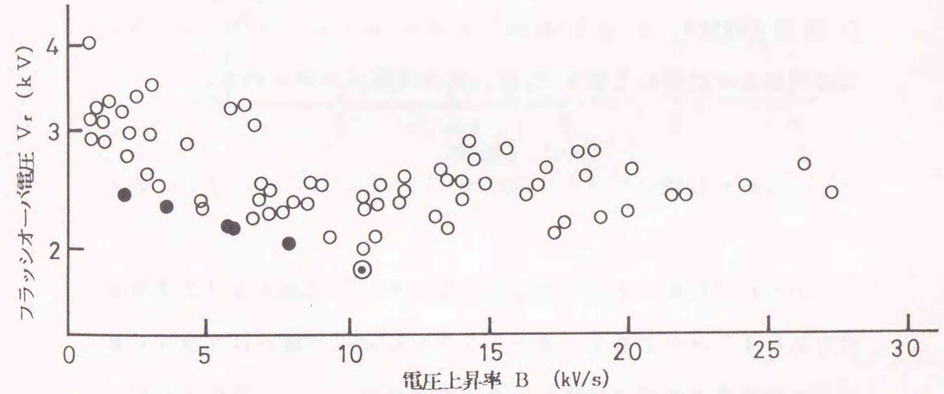
<3．3．1> V_f とBとの関係

図3．2に方形汚損帯の長さℓ（cm）、幅b（cm）および初期塩分付着密度w（mg/cm²）を種々変えた場合の実験結果の例を片対数グラフ上に示す。図中の○印、●印および◉印が個々の測定点である。前述のように電圧の上昇を手動で行っているため測定点は各々独立しており、フラッシオーバ電圧V_fは上昇率Bに関して図のような分布を示している。また、図中●印で示した測定点は、それが得られた上昇率Bのもとでの最低値に近いフラッシオーバ電圧と考えられる。本論文では、これらの測定点を「各上昇率Bに対する最低値V_B」と呼ぶことにした。ここでは、V_Bのうち最も低い◉印の値V_ℓが得られる上昇率までの範囲におけるV_BとBの関係について検討を行う。

図3．2（a）、（b）から明らかなように、フラッシオーバ電圧V_fにはかなりのばらつきがあり、特に上昇率Bが小さくなるとばらつきが大きくなる傾向がある。しかし、各上昇率Bに対する最低値V_B（●印）に注目すると、V_Bは上昇率Bの増大に伴って低下する傾向を明らかに示している。さらに、w、ℓおよびbの各実験条件によって値は異なるが、ある上昇率でV_Bは極小値V_ℓ（◉印）をもつことが分かる。ここでは、このV_ℓを「極小フラッシオーバ電圧」あるいは単に「極小値」と呼ぶことにする。すなわち、これらのことから方形汚損帯の交流最低フラッシオーバ電圧V_Bは、電圧上昇率Bによって支配されることが明らかになった。



(a) w：0.17mg/cm², ℓ：5cm, b：5cm



(b) w：0.45mg/cm², ℓ：5cm, b：5cm

図3．2　フラッシオーバ電圧V_fと電圧上昇率B

＜３．３．２＞ 極小フラッシオーバ電界強度Ｅℓ

図３．３に、汚損幅ｂが５cm、塩分付着密度ｗが０．２８mg/cm² および０．４５mg/cm² における極小フラッシオーバ電圧Ｖℓ と汚損長ℓとの関係を示した。Ｖℓ はℓに対して直線で表すことができ、ℓ＝０に対応する電圧は両者ともにほぼ８４０Ｖ となった。これは電極降下電圧Ｖ$_E$[6]とみなされる。従って、極小フラッシオーバ電圧Ｖℓ は次式のように表すことができる。

$$V_\ell = E_\ell \ell + V_E \quad (kV) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

図３．３の結果も含めてＶℓ の実測値からＥℓ の平均値を求めると、ｗが０．１７mg/cm² では０．２５７kV/cm、０．２８mg/cm² では０．２３９kV/cm、０．４５mg/cm² では０．２１０kV/cm となった。この関係をｗに関して表す[9]と、次の実験式が得られる。

$$E_\ell = 0.18 w^{-1/5} \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.2)$$

このＥℓ は、極小フラッシオーバ電圧Ｖℓ に対応する平均電界強度とみなすことができる。また、フラッシオーバ電圧はフラッシオーバへ移行する瞬時の局部アーク放電（距離ℓa ）の電圧と残りの通路（距離$\ell_r = \ell - \ell_a$ ）における電圧降下の和である。

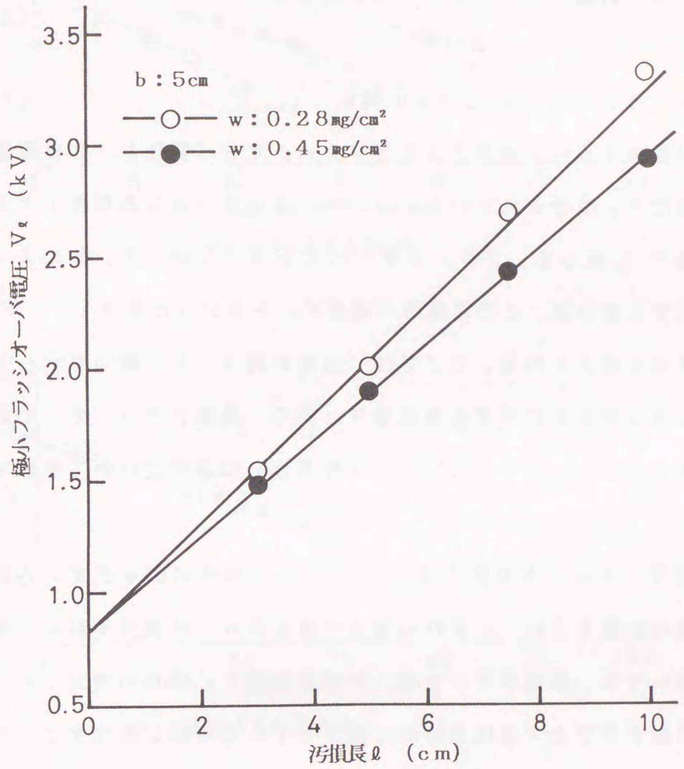


図３．３ 極小フラッシオーバ電圧Ｖℓ と汚損長ℓ

３．４　最低フラッシオーバ電界強度E_B

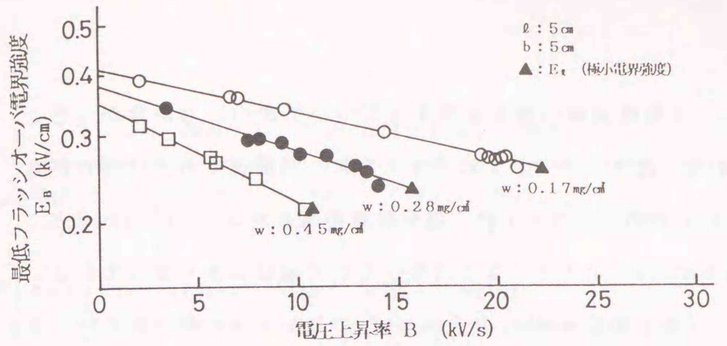
＜３．４．１＞ E_B とBとの関係

前述のように、実測された各フラッシオーバ電圧V_fには電極降下電圧V_Eが含まれている。このV_Eはほぼ一定とみなすことができる[8]。従って、フラッシオーバ電圧のうちw、ℓ、Bによって変化する部分は、この電極降下電圧V_Eを差引いた部分（$V-V_E$）であると考えられる。ここでは、前述の図３．２に●印で示したような各上昇率Bに対する最低値V_Bから、最低フラッシオーバ電界強度$E_B \equiv (V_B - V_E)/\ell$と上昇率Bとの関係について検討を行う。

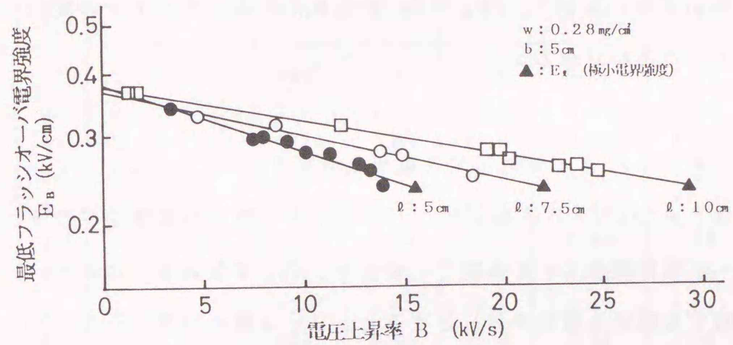
図３．４に、本実験で得られたE_B－B特性の例を示す。各図から明らかなように、いずれの塩分付着密度w、汚損長ℓおよび幅bにおいても、最低フラッシオーバ電界強度E_BはBの増大に伴って片対数グラフ上でほぼ直線的に減少しているものとみなすことができる。これらの点を図において直線近似すると次式のようになる。

$$E_B = E_0 \exp(-nB) \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots (３．３)$$

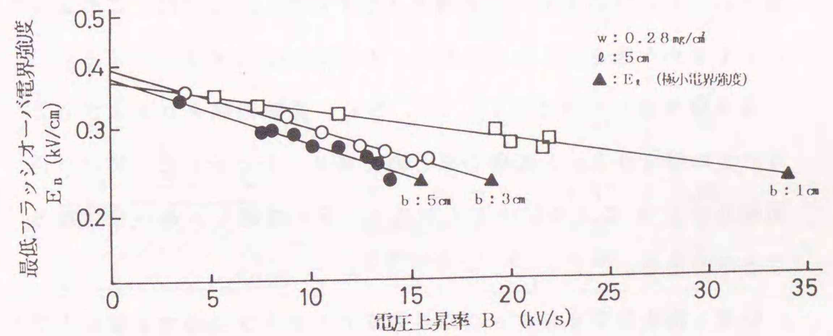
ここで、E_0は上昇法においては定義できないが、Bを十分に小さくした場合（以下、B→0と略記）の最低フラッシオーバ電界強度であると解釈される。このE_0に関しては、＜３．６．４＞項で検討する。また、nはこの直線の傾きを表す。表３．１に、最小二乗法によって求めた各実験条件におけるE_0とnの値を示した。



（a）塩分付着密度wを変えた場合



（b）汚損長ℓを変えた場合



（c）汚損幅bを変えた場合

極小値E_ℓについては＜３．４．２＞節参照

図３．４　最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係（E_B－B特性）

E_B-B特性直線の傾きを表すnについて次のことが分かった。すなわち、図３．４（ａ）に示すように、汚損長ℓおよび幅ｂが共に５cm の汚損帯においては、塩分付着密度ｗが０．１７、０．２８、０．４５mg/cm² と大きくなるに伴ってｎの値は大きくなっている。また、（ｂ）図はｗが０．２８mg/cm² でｂが５cmの例であるが、この場合はℓが５、７．５、１０cm と大になるに伴ってｎの値は逆に小さくなっている。更に、ｗが０．２８mg/cm² でℓ＝５cm の（ｃ）図においては、ｂが１、３、５cm と大きくなるに伴ってｎの値は増大することが分かる。

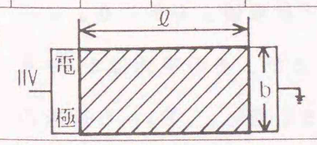
＜３．４．２＞ E_ℓ に対応する電圧上昇率B_ℓ

図３．４のE_B-B直線上に、（３．２）式で得られた極小フラッシオーバ電界強度E_ℓを▲印でプロットした。すなわち、このE_ℓに対応する電圧上昇率をB_ℓとすると、B_ℓは極小フラッシオーバ電圧V_ℓを生ずる上昇率である。なお、B_ℓが実測値より著しく大きくなる場合には（３．２）式からE_ℓを求め、E_B-B直線の延長上のE_ℓに対応するB_ℓを得るようにした。ここでは、このようにして求めた値をB_ℓの「実験値」と呼ぶことにする。

各実験条件におけるE_ℓ、E_0、B_ℓ、直線の傾きｎおよびｎとB_ℓとの積（ｎB_ℓ）の値をまとめて表３．１に示した。特に、汚損幅ｂが１cm のように小さくなると、B_ℓは著しく高い値になることが分かる。

いま、極小フラッシオーバ電界強度E_ℓおよび対応する電圧上昇率B_ℓは、（３．３）式においてE_BをE_ℓで、ＢをB_ℓで置き換えると次式のようになる。

表３．１　E_B-B特性における諸量

実験条件			*1	*2	*2	*3		
			E_ℓ	E_0	n	B_ℓ	n×B_ℓ	E_0/E_ℓ
w (mg/cm²)	ℓ (cm)	b (cm)	(V/cm)	(V/cm)	×10⁻²	(kV/s)		
0.06	5	1	318	505	0.32	144	0.46	1.59
	5	5		512	0.87	54.5	0.47	1.61
0.17	3	5	258	415	3.84	12.5	0.48	1.61
	5	5		410	2.10	22.1	0.46	1.59
0.28	3	5	233	390	5.23	9.8	0.51	1.67
	5	1		371	1.36	34.0	0.46	1.59
	5	2		367	1.88	23.8	0.45	1.57
	5	3		395	2.77	18.9	0.52	1.69
	5	5		381	3.17	15.5	0.49	1.63
	7.5	1		381	0.94	52.2	0.49	1.63
	7.5	5		371	2.11	22.0	0.46	1.59
	10	1		376	0.80	59.3	0.47	1.61
	10	3		360	1.15	37.9	0.43	1.54
	10	5		378	1.64	29.3	0.48	1.62
0.45	3	5	212	331	7.45	6.0	0.45	1.56
	5	1		338	1.86	24.9	0.46	1.59
	5	5		350	4.77	10.5	0.50	1.65
	7.5	5		342	2.90	16.5	0.48	1.61
	10	3		336	1.70	26.8	0.46	1.58
	10	5		337	2.20	20.8	0.46	1.58
汚損帯 				平　均 m			0.47	1.60
				標準偏差 σ			0.02	0.03
				変動係数 σ/m			0.04	0.02

*1：（３．２）式による値
*2：（３．３）式参照
*3：「実験値」【E_B-B特性直線(図3.4)上でE_ℓに対応する点、<3.4.2>節参照】

$$E_0 / E_\ell = \exp(n B_\ell) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

表３．１にはまた、各実験条件におけるE_0 / E_ℓの値も示してある。いずれの条件においてもE_0 / E_ℓはほぼ等しい値となり、その平均値は１．６であることが分かる。

＜３．４．３＞ B_ℓの実験式

図３．５に、表３．１から求めた同一塩分付着密度における汚損長ℓおよび幅ｂと上昇率B_ℓの「実験値」との関係を示した。B_ℓはいずれのｗにおいてもℓに対してほぼ直線的に表すことができる。すなわち、B_ℓはℓに比例し、またｗが大きくなると小さくなる。汚損幅ｂに関してはデータ数は十分ではないが、図中の曲線はｂの（－０．５）乗の変化を示しており、B_ℓはこの曲線に沿うものとみなして実験式を求めると次のようになる。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} b^{-0.5} \ell \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots (3.5)$$

ここでは、この実験式によって計算した値をB_ℓの「計算値」と呼ぶことにする。

表３．２に各実験条件におけるB_ℓの「計算値」を示した。B_ℓの「実験値」と「計算値」との比も示したが、その平均は１．０４となり、変動係数がほぼ７％となっている。特に、$E_B - B$直線の外挿によって求めたB_ℓが著しく大きい場合も含めて両者の差は小さく、（３．５）式はB_ℓの実験式として本モデル実験の範囲内ではほぼ満足し得るものとみなされる。

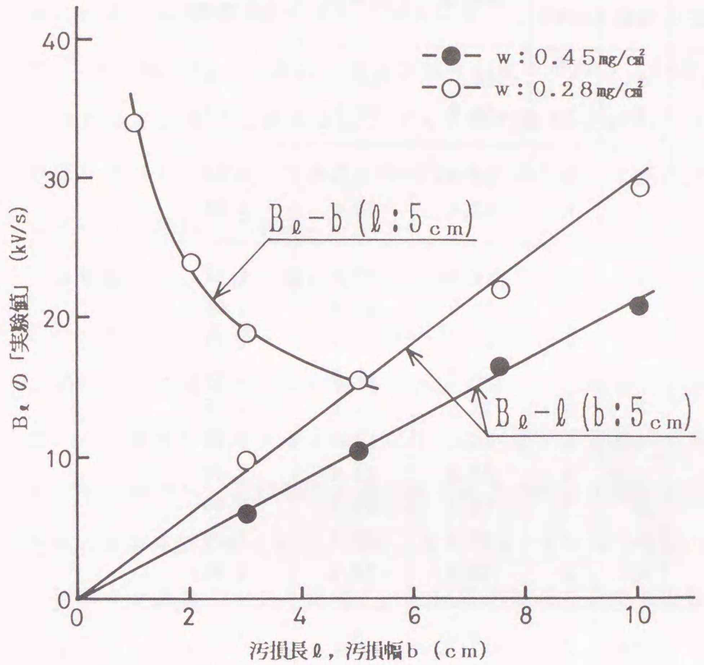


図３．５ B_ℓの「実験値」と汚損長ℓおよび汚損幅ｂ

表３．２　Bℓの「実験値」と「計算値」との比較

実験条件			Bℓ (kV/s)		
w (mg/cm²)	ℓ (cm)	b (cm)	実験値*1	計算値*2	実験値／計算値
0.06	5	1	144	122	1.18
	5	5	54.5	54.4	1.00
0.17	3	5	12.5	13.5	0.93
	5	5	22.1	22.4	0.99
0.28	3	5	9.8	8.8	1.11
	5	1	34.0	32.8	1.04
	5	2	23.8	23.2	1.03
	5	3	18.9	19.0	1.00
	5	5	15.5	14.7	1.05
	7.5	1	52.2	49.2	1.06
	7.5	5	22.0	22.0	1.00
	10	1	59.3	65.7	0.90
	10	3	37.9	37.9	1.00
	10	5	29.3	29.4	1.00
0.45	3	5	6.0	5.9	1.02
	5	1	24.9	21.9	1.14
	5	5	10.5	9.8	1.07
	7.5	5	16.5	14.7	1.12
	10	3	26.8	25.3	1.06
	10	5	20.8	19.6	1.06
			平　均　m		1.04
			標準偏差　σ		0.07
			変動係数　σ／m		0.07

*1：表３．１による値
*2：（３．５）式による値

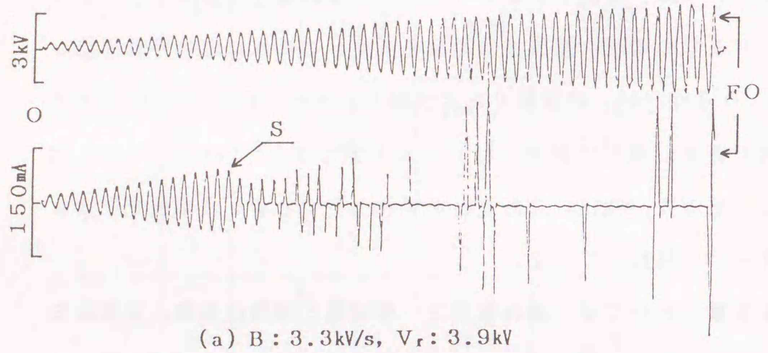
３．５　フラッシオーバ前の局部アーク放電

＜３．５．１＞ 上昇率Bによる電流変化

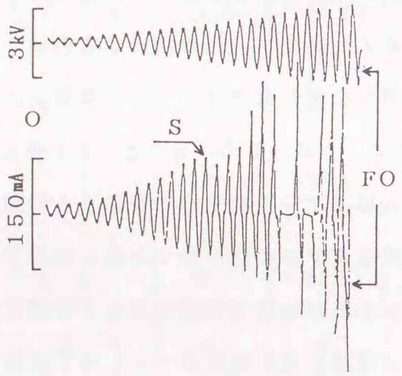
図３．６に、電磁オシログラフＥＯによる電圧印加からフラッシオーバまでの電圧、電流波形の例を示す。これらは塩分付着密度wが０．０６mg/cm²、汚損長ℓおよび幅bがそれぞれ５、１cm における例である。電圧上昇率Bは、（ａ）図では３．３kV/s、（ｂ）図では２倍の６．６kV/s であり、いずれもＦＯと示した半波でフラッシオーバへ移行している。

本実験においては、漏れ電流は一般に電圧印加の初期、すなわち図３．６のＯ－Ｓ間においては連続的に現われる。その後の電圧の上昇によって電極の近傍に乾燥帯が生ずる。この乾燥帯の両端を局部アーク放電が橋絡するようになり、この時点で電流はやや減少する。その後のＳ－ＦＯ間での漏れ電流はランダムな発生となり、またその波高値が大きくなる。図３．６の（ａ）と（ｂ）を比べると、上昇率Bが大きくなると局部アーク放電の始発に至る時間および始発後フラッシオーバに至るまでの時間が短くなる。局部アーク放電が始発してからフラッシオーバに至るまで（Ｓ－ＦＯ間）の局部アーク放電を介したサージ電流の発生波数は（ａ）図ではおよそ３５半波、（ｂ）図では２０半波となり、ほぼBに逆比例的になっている。

図３．７には、掃引時間を大きくした場合のフラッシオーバ移行近傍における電圧、電流波形のオシログラムを示した。これはオシロスコープによる波形をビデオテープに収録してスケッチしたものである。また、流し写真による局部アーク放電の状態も併せて示し



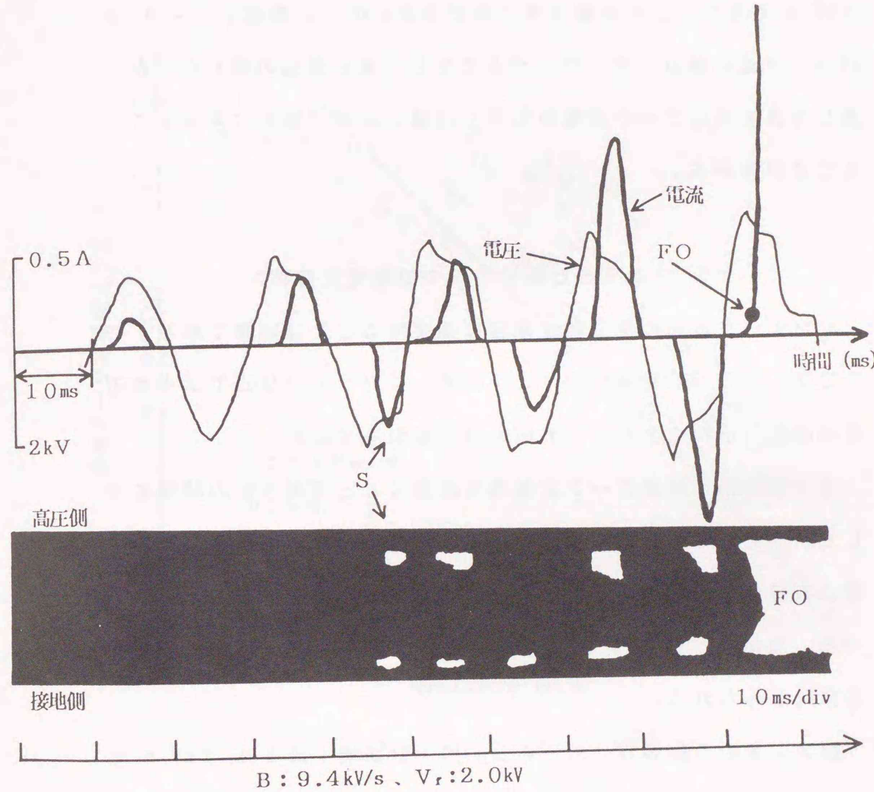
(a) B：3.3kV/s, V_r：3.9kV



(b) B：6.6kV/s, V_r：3.6kV

w：0.06mg/cm², ℓ：5cm, b：1cm
S：局部アーク放電の始発
V_f：フラッシオーバ電圧

図3．6　電磁オシログラフによる電圧、電流波形



B：9.4kV/s、V_r：2.0kV

w：0.45mg/cm²、ℓ：5cm、b：5cm

図3．7　フラッシオーバ移行近傍における電圧、電流波形のオシログラムと流し撮りによる局部アーク放電の発光状態図

た。この場合は、局部アーク放電の発生時点を明らかにするため電源回路に３００Ωの抵抗を直列に挿入しているので、局部アーク放電の発生に伴って電圧が降下している。図３．７の上昇率Ｂは９．４kV/s であり、この実験条件におけるＢℓの「計算値」（＝９．８kV/s）に近い場合のオシログラムである。漏れ電流の現われ方が、流し写真の局部アーク放電の始発と消滅にほぼ同期的に対応していることが分かる。

＜３．５．２＞ 上昇率Ｂと局部アーク放電発生波数Ｎ

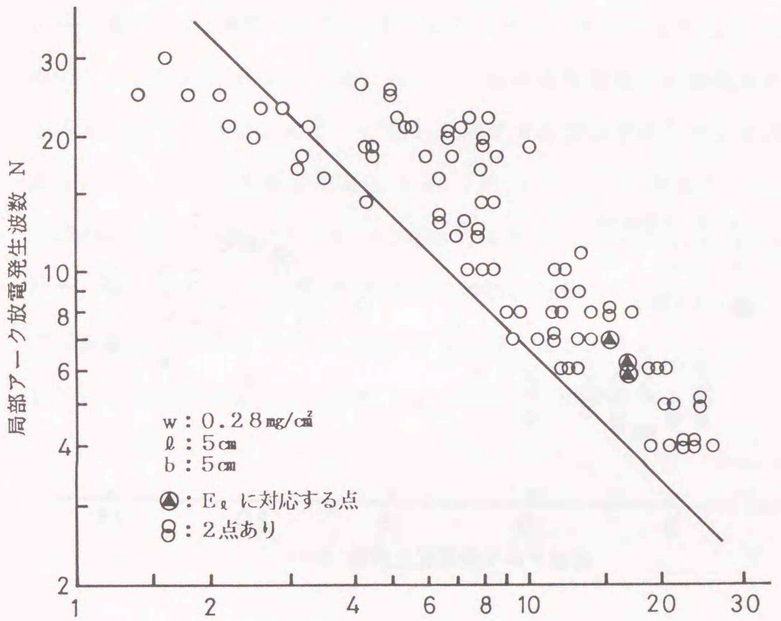
局部アーク放電の発生数を厳密に測定することは困難である。ここでは、図３．６および図３．７のオシログラムのＳ点で示される電流の変化を始点として、大約の発生波数を求めた。

図３．８に、局部アーク放電発生波数Ｎと上昇率Ｂとの関係を示した。すなわち、Ｂの増大に伴ってＮが減少している。図中の－１乗の直線から分かるように、ＮはほぼＢに逆比例しているとみなしうる。なお、Ｂが１kV/s に近付くとＮは３０～４０程度に収束する傾向がみられる。

図３．８の実験条件におけるＢℓの「計算値」は１４．７kV/s である。すなわち、同図からこの上昇率近傍の波数Ｎは６～８の範囲にあることが分かる。

＜３．５．３＞ Ｎとフラッシオーバ電圧Ｖf

図３．９に、上昇率Ｂを変化させた場合のフラッシオーバ前までの局部アーク放電発生波数Ｎとフラッシオーバ電圧Ｖf との関係を示した。これは図３．８の測定結果をＶf とＮについて整理したも



Eℓ については＜3．5．3＞節参照

図３．８　局部アーク放電発生波数Ｎと電圧上昇率Ｂとの関係

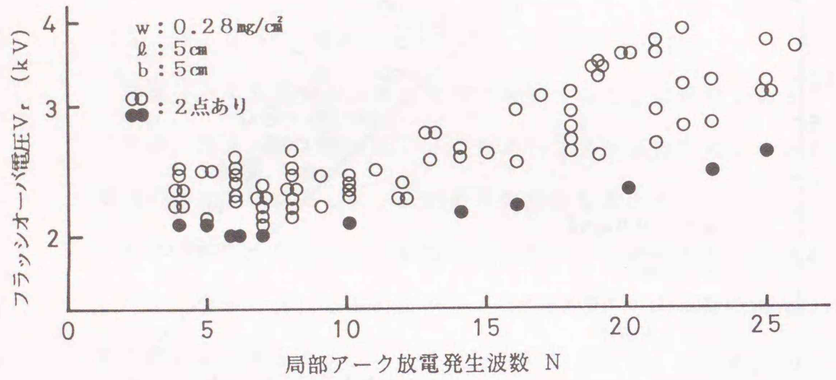


図３．９　フラッシオーバ電圧Ｖｆと局部アーク放電発生波数Ｎとの関係

のである。Ｎの増大に伴って明らかにフラッシオーバ電圧Ｖｆが高くなり、またばらつきも大きくなっている。図３．８と比較するとＮの増大は上昇率Ｂの減少に対応していることが分かる。

図３．１０に、図３．９の各発生波数Ｎのもとでの最低フラッシオーバ電圧Ｖｂ（●印）に対応する最低フラッシオーバ電界強度Ｅｂを示した。Ｎが６および７波において、極小電界強度Ｅℓが現われている。図３．８にこのＥℓが生じた測定点を▲印で示した。この場合のＢℓの「計算値」である１４．７kV/s に近い上昇率の１５．７kV/s の１点、および１６．８kV/s にある２点がそれぞれに対応している。また、Ｅ。に対応する発生波数Ｎを図３．１０で外挿して求めると約３３波となる。図３．８の測定点からも、Ｂを小さくしていくと発生波数Ｎはこの値に近づくことが推測される。

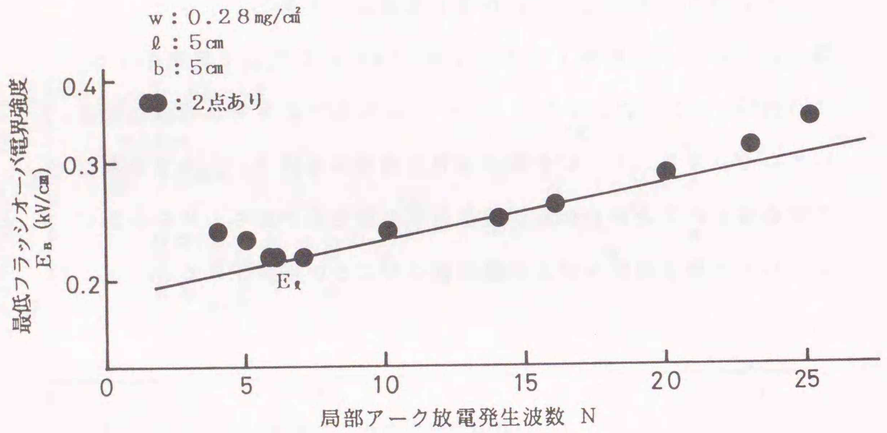


図３．１０　最低フラッシオーバ電界強度E_Bと局部アーク放電発生波数Ｎとの関係
［図３．９のV_B（●印）に対応］

３．６　考察

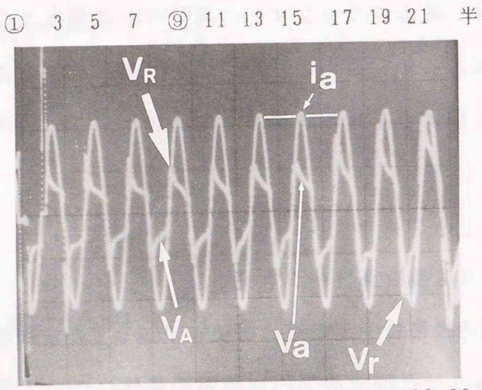
上述の実験結果は、最低フラッシオーバ電圧V_Bは電圧上昇率Ｂの増大に伴って漸減するが、極小値V_ℓを経て上昇に転ずることを示している。なぜこのような特性が得られるかについて、以下に定性的な考察を行う。

＜３．６．１＞ 交流汚損沿面アーク放電

先に著者は、乾燥汚損帯に一定の交流電圧を印加してから加湿し、フラッシオーバが起こった後でのアーク放電の特性について実験的な検討を行った[9]～[19]。この件に関しては第１章＜１．２．２＞項および第２章において詳述したが、これはアークコラムの浮上がほとんどない時間範囲内において半波毎に繰り返す交流汚損沿面アーク放電についての検討である。その際得られた電圧、電流オシログラムを図２．４に例示したが、この他の一例を図３．１１に示す。同図において、アーク電圧Ｖａは初め減少するが、その後アーク放電の繰り返しと共に高くなっている。この例ではフラッシオーバ始発後の６半波目に極小値V_Aに至っている。図３．１１の例も含めて、交流汚損沿面アーク放電について得られた結果を要約すると次のようになる。

（ｉ）各半波における再点弧後のアーク電流の最大値ｉａに対応するアーク電圧Ｖａは、最初のフラッシオーバの前に局部アーク放電が多発すると高くなる。

（ⅱ）フラッシオーバ始発後に見られる半波毎のアーク放電の繰り返しと共にアーク電圧Ｖａは初め漸減するが、極小値V_Aを経て



半波①:フラッシオーバの始発
⑥:アーク電圧Ｖａ の極小値（V_A）
⑨:再点弧電圧Ｖｒ の極小値（V_R）
ｉａ:アーク電流

V_{app}:２０kV_{rms}
w:０．１mg/cm^2, ℓ:１０cm, ｂ:１cm

図３．１１　交流汚損沿面アークの電圧Ｖａ、電流波形ｉａと再点弧電圧Ｖｒ

上昇に転ずる。

（ⅲ）このアーク電圧Ｖａの変化は、アーク放電の繰り返しに伴って汚損面から蒸発・飛散するＮａ原子の放電空間における挙動によるものであると推測した。すなわち、次のように考えた。

フラッシオーバ始発後数半波のアーク放電においては、その繰り返しによって電離電圧の低いＮａ原子[60]が汚損面から蒸発・飛散し、アークコラム中のＮａ原子数密度が増大してアーク電圧は漸減する。しかし、繰り返しと共に汚損面の汚損度が減少してアークコラム中へのＮａ原子の注入量が減少する。一方、アークコラム中のＮａ原子はコラム外へ拡散する。この両作用によって、コラム中のＮａ原子数密度はある繰り返し数の後小さくなる。このためアーク電圧Ｖａは極小値V_A（図３．１１では６半波目）を経て、その後の繰り返しと共に高くなるものと考えられる。

＜３．６．２＞ 再点弧電圧の特性

次に、図３．１１のオシログラム中の各半波におけるフラッシオーバ電圧Ｖｒ（再点弧電圧）に注目してみよう。再点弧電圧Ｖｒもまたアーク電圧Ｖａと同様にフラッシオーバ始発後極小値（V_R：図３．１１の例では９半波目）まで漸減し、その後の再点弧の繰り返しと共に高くなるという特性を示している。

この再点弧電圧Ｖｒは、アーク電圧に比べると汚損沿面フラッシオーバに関して、より直接的なデータを与えるものと考えられる。第２章で詳述したように、Ｖｒが極小値となる波順は全面汚損時および全面非汚損時においてアーク電圧Ｖａの極小値V_Aとほぼ同じ（厳密には２半波程度遅れるが）である。このように、アーク電圧Ｖａと再点弧電圧Ｖｒとが非常によく似た経過をたどるということ

は、極めて重要な点であると考えられる。

すなわち、V_r はフラッシオーバ電圧であるからアーク電圧V_aとは全く同質のものであるとはいい難いが、共に放電空間中の気体の電離による導電に関連する量である。従って、V_r とV_a は空間中の気体の諸性質、ことに気体を構成する原子あるいは分子の電離電圧に大きく支配されるものと考えられる[21]。この点に関してはV_r とV_a とが強い類似性をもっていることからも推測できる。

＜３．６．３＞ 汚損沿面フラッシオーバ電圧V_f と V_a およびV_r との関連

本節では、本章で取扱っている汚損沿面フラッシオーバ電圧V_fと、前述のアーク電圧V_a および再点弧電圧V_r との関連について考察を行う。

一般に、交流汚損沿面フラッシオーバはそれに先立つ局部アーク放電の発生と消滅あるいは伸展の繰り返しを経て起こることが知られている[22]～[25]。従って、この場合のフラッシオーバ電圧は局部アーク電圧と、そこからフラッシオーバへ移行する際の残余通路（$\ell_r = \ell - \ell_a$）のフラッシオーバ電圧との和になる。

本章においては、電圧上昇法を用いてこのフラッシオーバ電圧とフラッシオーバ前までの局部アーク放電の発生波数Ｎとの関係について調べた。その結果、電圧上昇率Ｂによって局部アーク放電発生波数Ｎが変化し、Ｎの増大に伴って最低フラッシオーバ電圧V_B が高くなることが明らかになった（図３．９参照）。また、発生波数Ｎの増大は上昇率Ｂの減少に対応し、ＮはほぼＢに逆比例しているものとみなしうる（図３．８参照）。

極小フラッシオーバ電圧V_ℓ が生ずるような電圧上昇率B_ℓ のもとでは、図３．７のオシログラムと流し写真にある局部アーク放電は半波毎に連続的に発生し、フラッシオーバへ移行している。従って、このように連続的に局部アーク放電が発生するような場合においては、第１章＜１．２．２＞項および第２章で述べたフラッシオーバ後のアーク放電特性ならびに再点弧電圧特性に近い現象が現われているものと考えられる。すなわち、フラッシオーバ時点で放電空間のＮａ原子数密度が最大となる条件が極小フラッシオーバ電圧を発生させる条件であると推測される。第２章の研究においては、アーク電流や汚損条件にもよるがアーク電圧の最低値V_A はフラッシオーバ後のＮが５～８半波において、また再点弧電圧の最低値はＮが５～１０半波において生じている。一方、本章では図３．８のＮとＢとの関係において、極小フラッシオーバ電圧はＮが６あるいは７半波において発生している。従って、連続的な局部アーク放電からフラッシオーバへ移行する場合には、この程度の波数のもとで空間のＮａ原子数密度が最大になるものとみなし得る。このため、Ｎが６、７半波においてフラッシオーバ電圧が極小値を示しているものと推測される。

一方、局部アーク放電が連続して発生しない場合には、局部アーク放電によって汚損面から蒸発・飛散したＮａ原子がフラッシオーバ時点までに有効に放電空間に残留しないで拡散し、結果的にフラッシオーバ電圧が高くなるものと考えられる。本実験においては電圧上昇率Ｂが小さくなると発生波数Ｎは大になるが、局部アーク放電の発生が著しく間欠的になりＮａ原子の累積が小さい。このため上昇率Ｂが小さくなるとフラッシオーバ電圧が高くなるものと考えられる。

＜３．６．４＞ E。に関する検討

図３．４に示したE$_B$－B特性において上昇率B＝０に対応する最低フラッシオーバ電界強度E。は、上昇法においてはその物理的意味が必ずしも明確ではない。しかし、Bを十分に小さくした場合（B→０）の最低フラッシオーバ電界強度とみなし得るので、一定電圧を印加した場合のそれに近いものと考えられる。そこでここでは、等価霧中法と同様わが国の代表的ながいしの人工汚損試験法である定印霧中法[1]によって得られた最低値との比較、検討を行う。

図３．１２に、全面を均一に汚損した方形モデルの定印霧中法による最低フラッシオーバ電界強度E$_f$と汚損長ℓとの関係を示す。図中の各測定点は、それぞれの汚損幅bにおける多数回の実験結果のうちの最も低い値である。また、実線は本研究結果によるEℓ（（３．２）式）とE。の値を示している。ただし、E。は＜３．４．２＞項の表３．１に示したように１．６Eℓとなる。

図３．１２から、汚損幅bが同一の場合には、E$_f$はℓに対してほぼ一定であり、また、同一汚損長においてはbが大になるに伴ってE$_f$が低下し、その最も低い値（ℓ＝７㎝、b＝９㎝）はE。とほぼ一致している。このことは、実がい管類における定印霧中法あるいは定印繰返し法によるフラッシオーバ電圧が同一がいし長に対して胴径が大になるに従い低下し、ついには一定値に落ち着くという従来の報告[3]と一致している。

一般に、定印霧中法においては、著しく過大な電圧を印加しない限りフラッシオーバまでにはかなりの時間を要する。従って、その間に発生する多数の局部アーク放電によって汚損面から汚損成分が蒸発・飛散する。既に考察してきたように、この汚損成分の中でフラッシオーバ電圧に関与するのは主として電離電圧の低いＮａ原子

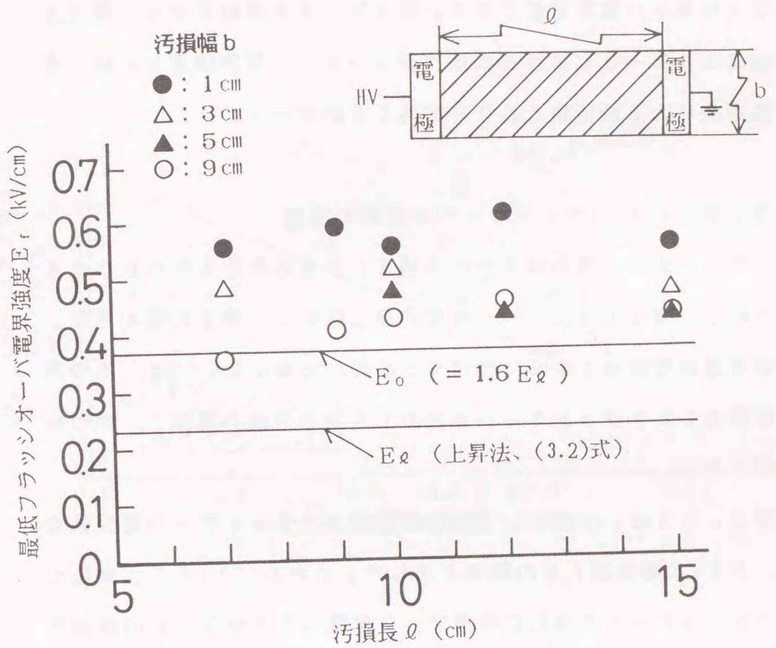


図３．１２ 定印霧中法による平等汚損方形モデルの最低フラッシオーバ電界強度と汚損長との関係（w：０．２８㎎/㎠，k：０．１１㎎/㎠）

であると考えられる。すなわち、フラッシオーバまでに時間がかかり過ぎると、早期に蒸発・飛散したＮａ原子はフラッシオーバへ移行する際の放電には寄与しないことになるものと考えられる。電圧上昇法におけるＥ₀は、正にこのような条件のもとで得られる最低フラッシオーバ電界強度である。従って、本実験結果から、電圧上昇法によるＢ→０における最低フラッシオーバ電界強度Ｅ₀は、定印霧中法による最低値とみなされることが分かった。

＜３．６．５＞ フラッシオーバ半波前の電流

フラッシオーバ電界強度が極小値Ｅℓとなる条件を明らかにするためには、前述の局部アーク放電の発生数および発生位置の他に、その半波の電流値を詳細に検討する必要がある。ここでは、その第１段階としてフラッシオーバ半波の１つ前の半波の電流Ｉₚについて調べた。

図３．１３に、一例として全面汚損時のフラッシオーバ電界強度Ｅ𝒻とＩₚ（実効値）との関係を示した。ただし、Ｉₚ＝０、すなわちフラッシオーバ半波前に局部アーク放電の発生がないものは除外した。図の例では、Ｉₚは０．１６～１．８Ａの範囲に広く分布しているが、1A 以上のデータが多くなっている。とりわけ、最低フラッシオーバ電界強度Ｅ_Ｂ(●印)は０．６～１．７Ａ、および極小値Ｅℓは１．１Ａで得られている。Ｉₚはフラッシオーバ半波前の電流であるから次半波でのフラッシオーバ空間の電離状態に大きく影響するものと考えられる。従って、Wilkins氏[8]やAlston氏ら[23]によるフラッシオーバ臨界電流ｉ_Ｃと同様な意義を持っているものとみなすことができる。Wilkins氏はｉ_Ｃとして６０mA 程度の値を、またAlston氏らは印加電界強度が２７０～７５０V(peak)/cm の範囲で

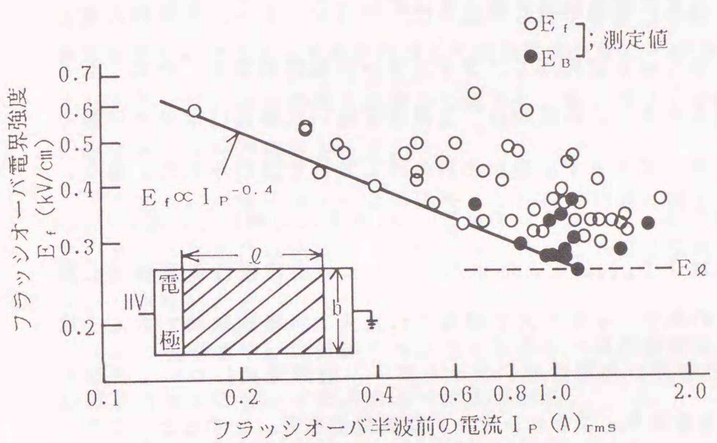


図３．１３フラッシオーバ電界強度Ｅ𝒻とフラッシオーバ半波前の電流Ｉₚとの関係
（ｗ：０．１７mg/cm²，ℓ＝５cm，ｂ＝３cm）

i_c の最大値 i_{max} を４０～１５０mA(peak)すなわち実効値で３０～１００mA と報告している。本実験における I_F は、いずれの値よりもかなり高くなっている。これは、＜１．２．２＞項で述べたように、両氏がフラッシオーバ移行時の局部放電の特性を汚損沿面アーク特性ではなく空気中あるいは水蒸気中のアーク特性に置き換えて解析を行っているためではないかと考えられる。

また、図中に実線で示したように、フラッシオーバ半波前の電流 I_F が大きくなるに従ってフラッシオーバ電界強度 E_f が低くなる傾向が見られる。この傾向は、上昇法を用いた場合には平等汚損や不平等汚損に関わらず広範な汚損条件において認められた。図３．１３の例では、E_f は I_F のほぼ－０．４乗に比例している。Verma 氏ら[27]は「I_{max}法」と称されるがいしの耐汚損性能評価法に関する報告の中で、イギリスで開発された人工汚損試験法である「塩霧法」[1]を用いた場合のフラッシオーバ臨界電流について検討している。すなわち、フラッシオーバ臨界電流を I_c とすると、フラッシオーバ電界強度の臨界値は $E_c \propto I_c^{-0.5}$ と表されるとしている。塩霧法では通常フラッシオーバ半波前に最大漏れ電流 I_{max} が現われるため I_c は I_{max} と同等であり、従って $E_c \propto I_c^{-0.5}$ はフラッシオーバ半波前の電流の特性と見なしてよい。塩霧法は、がいしに課電してから塩水を噴霧して加湿する方法をとっており本実験とは条件が異なる点が多いにもかかわらず、著しく類似する特性を示すことに注目する必要がある。

３．７　まとめ

わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである「等価霧中法」における最低フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係について実験的な検討を行った。実験は実用がいしのモデルとして方形汚損帯を用いて行った。本章で得られた結果をまとめると、次のようになる。

（１）最低フラッシオーバ電圧 V_B あるいは最低フラッシオーバ電界強度 E_B は電圧上昇率Ｂに対して依存性を示すことが分かった。すなわち、V_B はＢの増大に伴って低下し、極小値 V_ℓ を経て上昇に転ずるＶ字形の特性を示す。

（２）V_B の極小値 V_ℓ は汚損長 ℓ と共に直線的に増大する。また、$\ell = 0$ における値は８４０V となった。この値を電極降下電圧 V_E とみなした。

（３）極小値 V_ℓ に対応するフラッシオーバ電界強度 E_ℓ は、塩分付着密度ｗについて次式のように表される。

$$E_\ell = 0.18 w^{-1/5} \quad (kV/cm)$$

この関係を用いると、V_ℓ は次式のように著しく簡単な実験式で表される。

$$V_\ell = 0.18 w^{-1/5} \ell + V_E \quad (kV)$$

（４）V_B に対応する電界強度 E_B とＢとの関係は、$B \leqq B_\ell$ の範囲では指数関数、$E_B = E_0 \exp(-nB)$ で表すことができる。ただし、E_0 はＢ→０における最低フラッシオーバ電界強度であると解釈され、ｎと共に最小二乗法によって求めた。

（５）E_B－Ｂ直線上に第（３）項の E_ℓ の値をプロットし、この E_ℓ に対応する上昇率 B_ℓ を求めると、直線の傾斜ｎと B_ℓ との積（nB_ℓ）は塩分付着密度ｗ、汚損長 ℓ および汚損幅ｂによらず一定となった。従って、E_0 / E_ℓ の値も一定値（＝１．６）となる。

なお、E_B－B直線上から求めたB_ℓを「実験値」と呼ぶことにした。

（６）汚損長ℓおよび汚損幅bがそれぞれ5cmにおけるB_ℓの「実験値」から、B_ℓの実験式として次式が得られた。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} b^{-0.5} \ell \quad (kV/s)$$

この実験式によって得られるB_ℓを「計算値」と呼ぶことにした。このB_ℓの「計算値」は、他のℓおよびbに対する「実験値」をもよく表すことが分かった（表３．２参照）。

（７）フラッシオーバ前までの局部アーク放電の発生波数Nはほぼ上昇率Bに逆比例する結果が得られた。

（８）極小フラッシオーバ電圧V_ℓを生ずる上昇率B_ℓのもとでは、局部アーク放電が半波毎に連続的に発生することが分かった。これは主として、局部放電によって汚損面から放電空間に蒸発・飛散する電離電圧の低いNa原子の挙動に基づくものと推測した。

（９）E_B－B特性においてB＝０に対応する最低フラッシオーバ電界強度E_0は、わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである「定印霧中法」による最低値にかなり近い値であることが分かった。実験的に得ることが必ずしも容易でない定印霧中法による最低フラッシオーバ電圧を、等価霧中法におけるE_0から容易に推測できることを示した。

（10）フラッシオーバ電圧を大きく支配すると考えられるフラッシオーバ半波前の電流I_Pは０．１～２Aの範囲に広く分布する。また、フラッシオーバ電界強度E_fはI_Pのほぼ－０．４乗に比例し、イギリスで開発された人工汚損試験法である「塩霧法」におけるフラッシオーバ電界強度の臨界値E_cとフラッシオーバ臨界電流I_cとの関係 $E_c \propto I_c^{-0.5}$ に近い特性が得られた。

参考文献

（１） 電気学会試験電圧標準特別委員会絶縁試験法小委員会編：「絶縁試験法ハンドブック」、p.287（昭51）、オーム社

（２） 電気学会：「ＪＥＣ－１７０（交流電圧絶縁試験一般）」、p.34（昭53）

（３） 塩害対策専門委員会送変電分科会(1)：「送変電設備の塩害対策」、電気協同研究、第２０巻、第２号（昭39）

（４） S.Fujitaka, T.Kawamura, S.Tsurumi, H.Kondo, T.Seta & M.Yamamoto",Japanese Method of Artificial Pollution Tests on Insulators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-87, No.3, p.729(1968)

（５） 佐藤・中野・加賀・赤上・岩泉・堀：「等価霧中法によるフラッシオーバ電圧の電圧上昇速度依存性」、放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-79-42,EIM-79-63、p.11(1979)

（６） 佐藤・加賀・赤上：「汚損沿面交流フラッシオーバ現象の基礎的研究」、秋田大学鉱山学部研究報告、2, p.43(1981)

（７） 佐藤・加賀・赤上：「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」、電気学会論文誌 A-104, 3, p.131（昭59）

（８） R.Wilkins,"Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films",Proc.IEE, 116, No.3, p.457(1969)

（９） 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの特性（塩分付着密度依存性）」、電気学会論文誌 B-98, 5, p.425(1978)

(10) 加賀・佐藤・斉藤・赤上：「課電吸湿汚損面上の交流アークの始動特性」、昭和50年電気学会全国大会、No.1239

(11) 加賀・朝野・赤上：「汚損がいしの交流アーク特性のバラツキについて」、昭和50年度電気関係学会東北支部連合大会、No.1C-11

(12) 加賀・佐藤・赤上・朝野：「交流汚損沿面アーク特性の機構について」、昭和51年電気学会全国大会、No.1012

(13) 加賀・佐藤・朝野・赤上：「交流汚損沿面アークの気温依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D12

(14) 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損面アークの塩分付着密度依存性」、昭和51年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2D14

(15) 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時の交流沿面アークの特性」昭和55年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2B8

(16) 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面交流フラッシオーバ電圧特性」、昭和58年電気学会全国大会、No.1065

(17) 加賀・佐藤・赤上：「汚損沿面および沿面フラッシオーバ時の電圧・電流特性」、昭和59年電気学会全国大会、No.1057

(18) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Study of Characteristics of AC Arc Dischatges on Polluted Insulator Surfaces", Jpn. J. Appl. Phys., 21, 4, p.574(1982)

(19) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reigniting Discharge Characteristics on Contaminated Insulator Surface", Annual Report of CEIDP,No.Ⅳ-8, Claymont,DE,USA, p.246(1984)

(20) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック（改訂新版）」、p.12,13（昭55）、オーム社

(21) 坂本、田頭：「新高電圧工学」、p.48,（昭49）朝倉書店

(22) 中島：「汚損によるがいしの閃絡電圧の低下」、電気学会雑誌 74, 791, p.894(1954)

(23) L.L.Alston & S.Zoledziowski,"Growth of discharges on polluted insulation", Proc.IEE, Vol.110, 7, p.1260 (1963)

(24) B.F.Hampton,"Flashover mechanism of polluted insulation", Proc.IEE, 111, 5, p.985(1964)

(25) E.Nasser,"Contamination flashover of outdoor insulation", ETZ-A, Bd.93, 6, p.321(1972)

(26) 松尾・大重：「電解質水溶液面における局部放電の進展モデル」、電気学会論文誌 A-96, 11, p.511（昭51）

(27) M.P.Verma, H.Niklasch, W.Heise, H.Lipken, G.F.Luxa & H.Schreiber,"The Criterion for pollution Flashover and its Application to Insulation Dimensioning and Control", CIGRE Report 33-09(1978)

第４章　不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性

４．１　まえがき

課電状態のがいし類は一般に不平等に汚損されている[1]~[3]。従って、汚損面が吸湿し、漏れ電流が流れ始めると、がいしの形状も原因となって漏れ電流密度はがいし面で不均一な分布を示すことになる。ところで、がいしの汚損フラッシオーバ現象に関する基礎的な実験は、平板や同軸円筒状のがいし表面に作製した方形状の全面均一な汚損帯を用いて行われることが多い[4]~[6]。これは、実用がいしが複雑な形状をしているため、実験結果を解析する際に様々な困難を伴うからである。前章で用いた方形モデルのように幅が一様な汚損帯は、理想的にはどの部分も漏れ電流密度が一定で、放電の発生条件は同一であると考えられる[7]。しかし、実用がいしにおいては、各部の電流密度が異なるため放電の発生条件は異なっている。従って、実用がいしのフラッシオーバ特性を知るためには、平等に汚損された方形状モデルのほかに、電極間の電流密度分布が不均一なモデルを用いてその基本的な特性を検討しておく必要がある。そこで、本論文では本章と次章において、電流密度分布が不均一な場合の交流フラッシオーバ現象についていくつかの実験的な検討を行った[8]~[11]。

がいし類の不平等汚損には、がいし類やその設置場所によって様々な形態があろう。その一つの例としては、がいし面上に形成され

た二つの局部的な汚損部が湿潤と共に汚損成分による細い電流通路で連結される場合が考えられる。そこで本章では、このような汚損状態を模擬するため、電極間を汚損部と非汚損部に分け、その非汚損部に汚損部と同一の汚損液でできるだけ細い電流通路を設けた不平等汚損モデルついて実験的な検討を行った。

本章では主として、

（１）非汚損部の長さと位置がフラッシオーバ電圧に及ぼす影響について、前章で取り扱った電極間の全面を平等に汚損した場合に対比して述べている。

更に、

（２）非汚損部の位置が局部アーク放電の伸展状態やフラッシオーバ時の極性に及ぼす影響についても述べている。

４．２　試料および実験方法

＜４．２．１＞ 試料

図４．１に試料と電極の配置を示す。また、試料である不平等汚損モデルの形状を図４．２に示す。

電極間に非汚損部を設けると漏れ電流が遮断され、印加電圧が非汚損部のフラッシオーバ電圧より高くなって初めて局部アーク放電の伸展が可能となる。従って、この場合最終的に電極間のフラッシオーバ電圧は高くなる。本実験は、汚損フラッシオーバ現象の検討の一手段として全面汚損時の特性と電極間の一部に非汚損部を設けた場合の特性を対比するのが目的である。そこで、電圧印加の初期に汚損部間に漏れ電流が流れるように、非汚損部に同一汚損液で幅約２㎜ の通路を設けた。以下これを「電流通路」と呼ぶ。非汚損部の塩分付着密度を無視できるようにするためには、できるだけ電流通路の幅を小さくする必要がある。しかし、小さ過ぎると電圧印加前に通路の汚損液が蒸発、乾燥してしまうため、本実験における電流通路の幅は２㎜ が限界であった。

図４．２（ａ）が本実験の基本モデルである。すなわち、電流通路をもつ長さℓ_0の非汚損部を電極間の中央に設けている。従って、非汚損部の両側にある汚損帯の長さℓ_1およびℓ_2は等しくなっている。これに対し（ｂ）～（ｅ）図に示すモデルは、非汚損部の位置を中央から偏在させている。

なお、電極の幅や汚損液に関しては、第３章の「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」の場合と同様である。

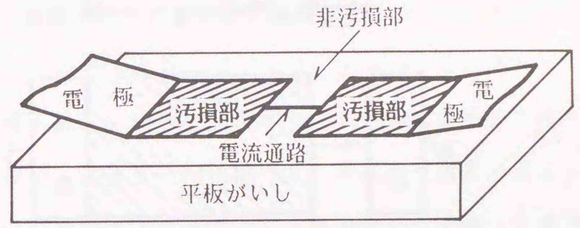
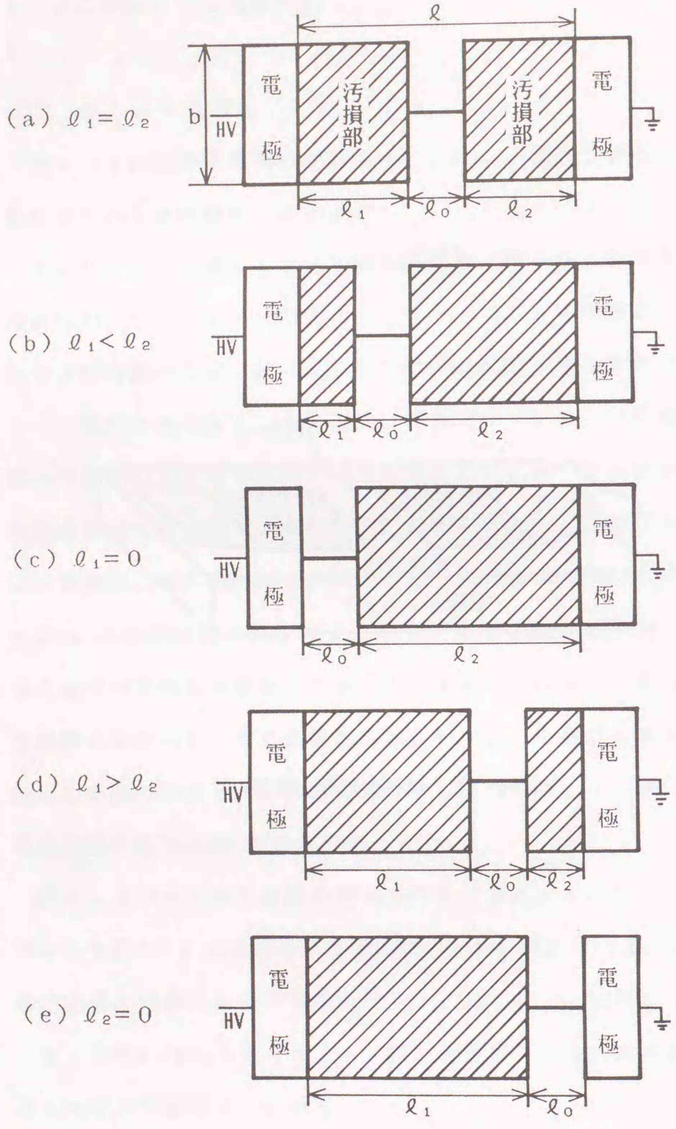


図４．１　試料と電極の配置



ℓ：電極間距離　　b：汚損部および電極の幅
ℓ_1：高電圧側汚損部の長さ　　ℓ_0：非汚損部の長さ
ℓ_2：接地側汚損部の長さ

図4．2　不平等汚損モデルの形状

＜4，2，2＞ 実験方法

実験は、前章の図3，1と同様な装置によって行った。初めに、所定の濃度の汚損液をがいし表面に飽和するまでスプレーする。この場合、汚損液の流動が汚損帯作製後の電極間方向に垂直になるよう、平板がいしを水平面に対して30度に傾けてスプレーを行った。次に、汚損液の流動がほぼおさまった時点で、図4，2に示した不平等汚損モデルを作製する。これを速やかに霧室に搬入し、電極をセットした後直ちに、電圧調整器によって電圧を手動で零から一定の上昇率で連続的に上昇させる。課電後フラッシオーバまでの電圧、電流はストレージ・オシロスコープ（TEKTRONIX 5103N）によって同時に記録した。更に、その各オシログラムから電圧上昇率ならびにフラッシオーバ前までの局部アーク放電発生波数を測定した。フラッシオーバ電圧および電圧上昇率は実効値に換算して整理した。また、各モデルにおける電圧印加からフラッシオーバまでの局部アーク放電の発生、伸展あるいは消滅の様子を観測するため、ストリークカメラ（菅原研究所、ストリーク5型）を用いて流し撮りによる写真撮影を行った。流し写真は、がいし面に水平で電極間に対して垂直な位置から撮影した。

なお、本実験においては試料である汚損液膜の蒸発を防ぎ、その厚さをできるだけ一定に保つようにした。このため、霧室は室温を30℃、相対湿度をほぼ100％に保持し、平板がいしおよび汚損液もスプレー前に30℃となるように調整している。

4．3　非汚損部が中央にある場合

＜4．3．1＞ 非汚損部の長さによる影響

本実験においては、汚損部の塩分付着密度wは0．28mg/cm² 一定、電極間距離ℓを5、10、15cm とし、非汚損部の長さℓ₀を1、2、3、5cm、汚損幅bは1、5、7.5、10cm の4種類とした。

図4．3に測定結果の例として、ℓ＝10cm およびb＝7.5cm においてℓ₀を2、3cm および5cm と変化させた場合の最低フラッシオーバ電界強度E_B[12]と電圧上昇率Bとの関係を示した。図中の○印の各測定点は、前章で説明した「最低フラッシオーバ電界強度E_B」[12]である。

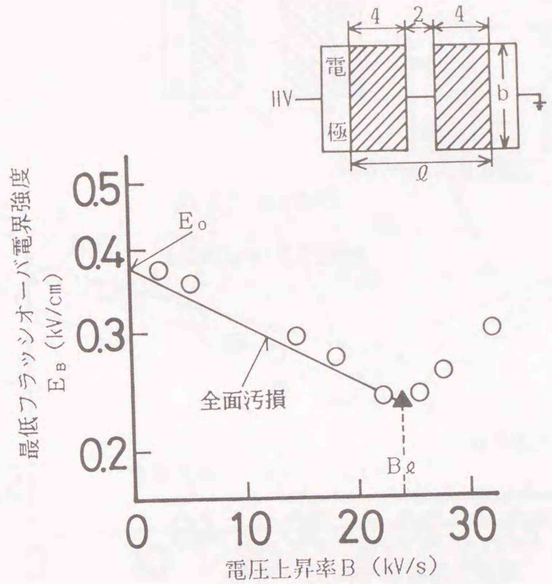
また、各図中に「全面汚損」と付記した実線は、本実験モデルと同一電極間距離、同一汚損幅の全面汚損モデルにおいて得られた最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの特性直線であり、すでに第3章で与えた次の関係[12]から求めた。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} b^{-0.5} \ell \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots\cdots (4．1)$$

$$E_\ell = 0.18 w^{-0.2} \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4．2)$$

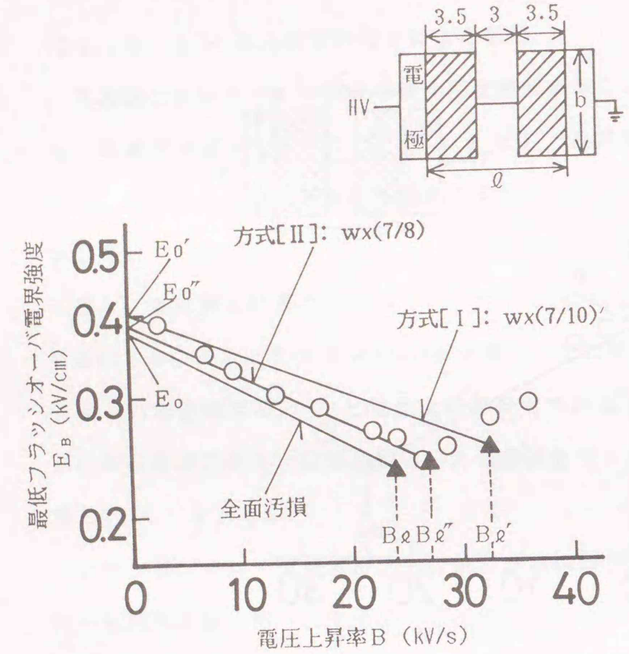
$$E_0 = 1.6 E_\ell \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4．3)$$

ただし、E_0は$E_B - B$特性直線のB＝0に対応する電界強度である。また、図中の▲印は（4．1）式のB_ℓに対応するフラッシオーバ電界強度E_ℓで、これは（4．2）式から得られる極小フラッシオーバ電界強度である。



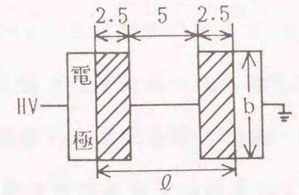
▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ）
ℓ：10cm，　b：7.5cm
w：0.28mg/cm²，　k：0.11mg/cm²

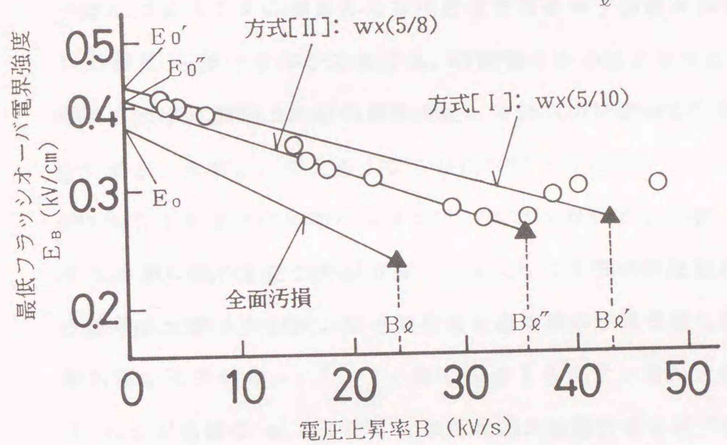
図4．3　最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係
（$\ell_1 = \ell_2$ モデルにおいてℓ_0を変えた場合）
（a）ℓ_0＝2cm の場合



▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ , $E_{\ell'}$, $E_{\ell''}$）
ℓ：10cm,　b：7.5cm
w：0.28mg/cm², 　k：0.11mg/cm²

図4．3　最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係
（$\ell_1=\ell_2$ モデルにおいてℓ_0を変えた場合）
（b）ℓ_0=3cm の場合





▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ , $E_{\ell'}$, $E_{\ell''}$）
ℓ：10cm,　b：7.5cm
w：0.28mg/cm², 　k：0.11mg/cm²

図4．3 最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係
（$\ell_1=\ell_2$ モデルにおいてℓ_0を変えた場合）
（c）ℓ_0= 5cm の場合

図４．３から明らかなように、非汚損部が電極間の中央にある場合のE_Bは上昇率Bの増大に伴って低下し、極小値を経て上昇に転じており、全面汚損時と同様な電圧上昇率依存性を示すことが分かった。

図４．３（ａ）に示すように、非汚損部の長さℓ_0が２cm においては、最低フラッシオーバ電界強度は全面汚損時のE_B-B特性直線とよく一致していることが分かる。本実験結果によると、ℓ＝１０cm においては、ℓ_0が２cm より小さくなるとE_B-B特性には非汚損部の影響が現われず、全面汚損の場合と同様であることが分かった。

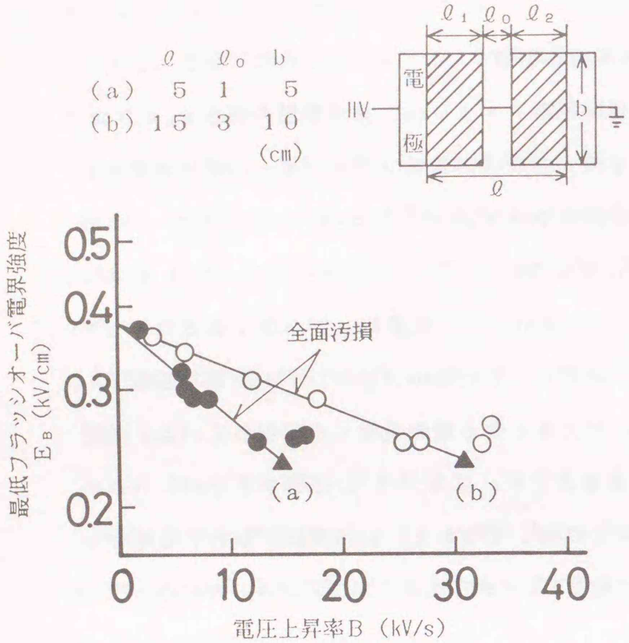
一方、図４．３（ｂ）および（ｃ）に示すように、ℓ_0が２cm より長くなると最低フラッシオーバ電界強度は全面汚損の場合より高くなる。また、その極小値および極小値に対応する電圧上昇率もℓ_0の増大に伴って大きくなる。従って、E_B-B特性が全面汚損時と同等である非汚損部の限界長は、ℓが１０cm の場合は２cm あるいは０．２ℓであると考えられる。

そこで、この限界長が２cm であるか、０．２ℓであるかを検討するために、ℓ_0＝０．２ℓに対応するように（ａ）ℓ＝５cm、ℓ_0＝１cm および（ｂ）ℓ＝１５cm、ℓ_0＝３cm のモデルを用いて同様な実験を行った。図４．４に示すように、（ａ）、（ｂ）いずれのモデルにおいてもE_Bの実測値は全面汚損時のE_B-B特性直線とほぼ一致している。従って、限界長は２cm ではなく０．２ℓであるということが明らかになった。すなわち、電流通路をもつ非汚損部が電極間の中央にある場合、その長さℓ_0が電極間距離ℓの２０％までは、最低および極小フラッシオーバ電界強度は全面が一様に汚

損されている場合と同一であることが分かった。

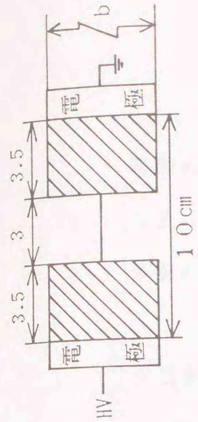
＜４．３．２＞ 汚損幅の影響

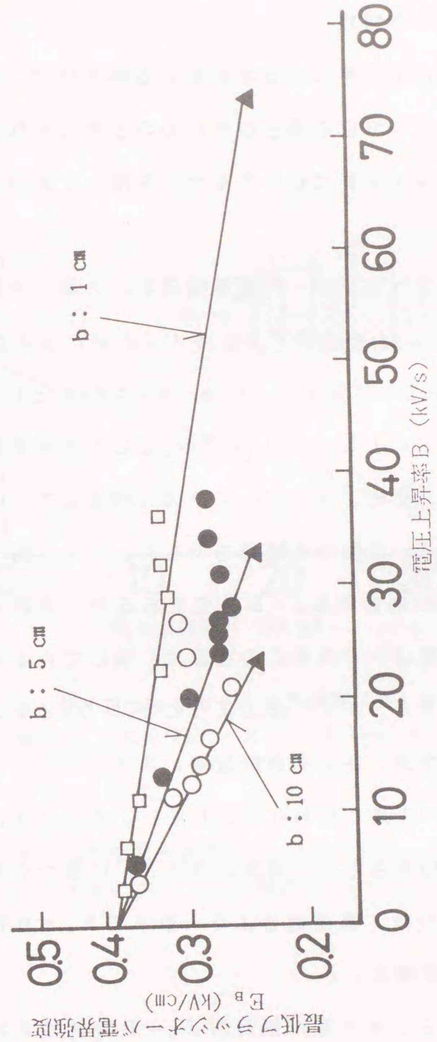
図４．５に、電極間距離ℓ＝１０cm、非汚損部の長さℓ_0＝３cm において汚損幅ｂを変えた場合の最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係を示す。ｂ＝７．５cm の場合については既に図４．３（ｂ）に示したので、ここではｂ＝１cm、５cm および１０cm の場合について図示した。汚損幅ｂが小さくなるに伴って同一Bに対するE_Bが高く、また極小フラッシオーバ電界強度E_ℓを生ずる上昇率B_ℓが大きくなる傾向が明らかに現れている。前述の（４．１）式によると、B_ℓは$b^{-0.5}$に比例するため、ｂが小さくなるとB_ℓは高くなる。すなわち、非汚損部が存在する場合も全面汚損の場合と同様なE_B-B特性を示すことが明らかになった。



▲：極小フラッシオーバ電界強度（Eℓ at Bℓ）
w：0.28㎎/㎠，　k：0.11㎎/㎠

図4．4 電極間距離ℓを変えた場合のEB とBとの関係
（ℓ1＝ℓ2 モデル、ℓ0＝0.2ℓ）





○，●，□：実測値
▲：Eℓ″at Bℓ″（方式[II]：w×(7/8)により計算）
w：0.28㎎/㎠，　k：0.11㎎/㎠

図4．5 汚損幅bを変えた場合のEB とBとの関係
（ℓ1＝ℓ2 モデル、ℓ0＞0.2ℓ）

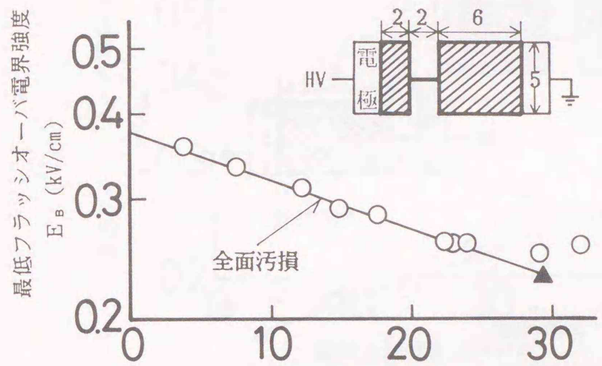
４．４　非汚損部が偏在している場合

＜４．４．１＞ E_B－B特性

一般に、がいし類が不平等に汚損されている場合には、非汚損部が電極間において偏在している場合が多いものと考えられる。そこで、図４．２（ｂ）～（ｅ）に示したモデルを用いて前節と同様な検討を行った。

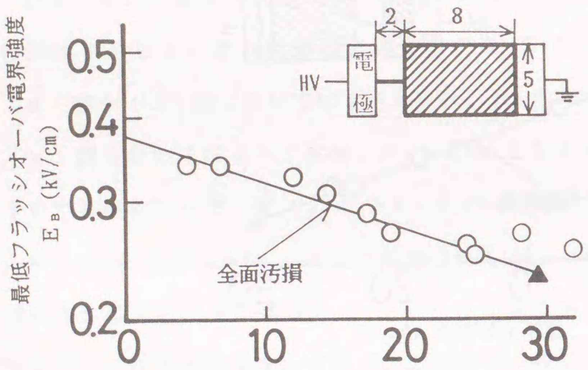
図４．６に、最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係を示した。これは非汚損部ℓ_0が０．２ℓとなるように、（ａ）図～（ｄ）図においてはℓ＝１０cm、ℓ_0＝２cm とし、また、（ｅ）図においてはℓ＝１５cm、ℓ_0＝３cm として非汚損部を偏在させて実験を行った。更に、ℓ_0＞０．２ℓの一例として（ｆ）図にℓ＝１０cm、ℓ_0＝４cm における結果を示した。（ａ）図～（ｅ）図の実線は全面汚損の場合のE_B－B特性であるが、各図の最低フラッシオーバ電界強度はいずれもこの実線に一致しているものとみなすことができる。また、（ｆ）図のようにℓ_0＞０．２ℓの場合のE_Bは、非汚損部が中央にある場合の図４．３（ｂ）、（ｃ）のように全面汚損時に比べて高く現われる。しかし、＜４．５．２＞項で述べるように、この場合も非汚損部の長さℓ_0に基づく実効的な塩分付着密度を求めれば、実測値とよく一致するE_B－B特性が得られる（（ｆ）図、直線②）。

以上の実験結果から、不平等汚損時のE_B－B特性は非汚損部の占める位置に関せず、その長さℓ_0のみによって決定することが明かとなった。



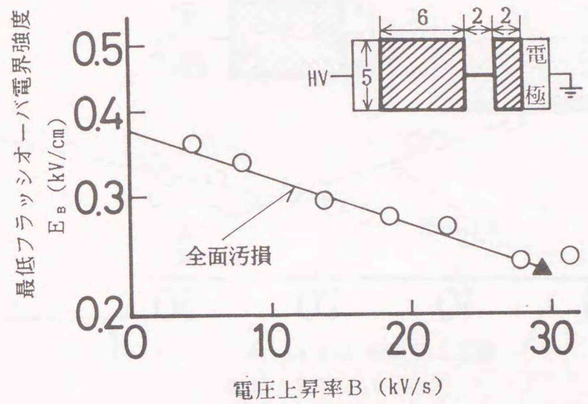
▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ at B_ℓ）
w：０．２８mg/cm²，　k：０．１１mg/cm²

図４．６　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（ａ）ℓ_1＜ℓ_2 の場合（ℓ_0＝０．２ℓ）



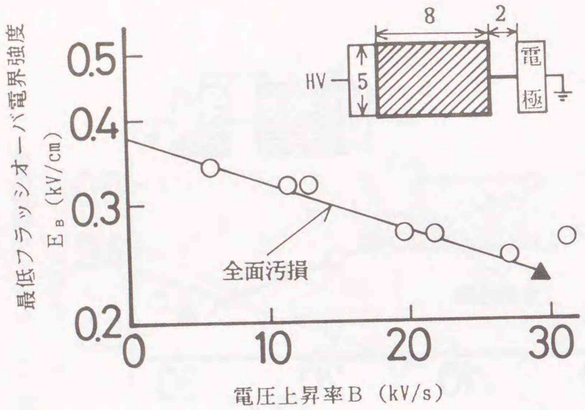
▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ at B_ℓ）
w：0.28mg/cm², k：0.11mg/cm²

図4．6　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（b）$\ell_1 = 0$の場合（$\ell_0 = 0.2\ell$）



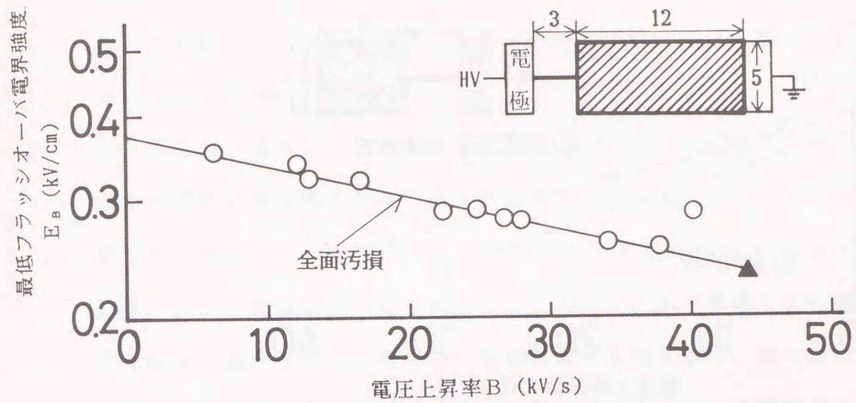
▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ at B_ℓ）
w：0.28mg/cm², k：0.11mg/cm²

図4．6　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（c）$\ell_1 > \ell_2$の場合（$\ell_0 = 0.2\ell$）



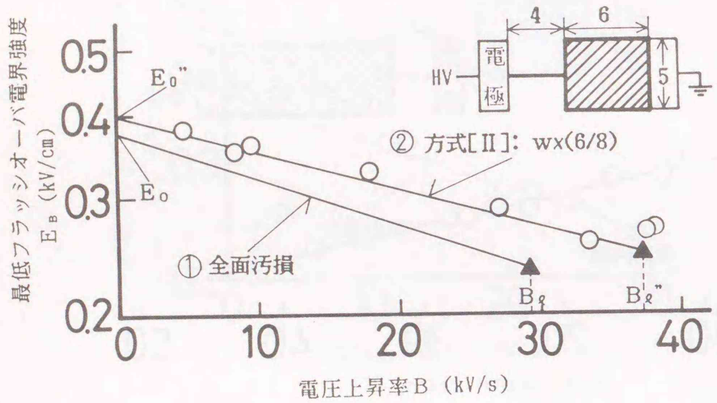
▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_{ℓ} at B_{ℓ}）
w：0.28mg/cm², k：0.11mg/cm²

図4．6　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（d）ℓ_2＝0の場合（ℓ_0＝0.2ℓ）



▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_{ℓ} at B_{ℓ}）
w：0.28mg/cm², k：0.11mg/cm²

図4．6　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（e）ℓ_1＝0の場合（ℓ_0＝0.2ℓ）



▲：極小フラッシオーバ電界強度（E_ℓ , E_ℓ''）
w：0.28mg/cm², k：0.11mg/cm²

図4．6　非汚損部が偏在している場合のE_B－B特性
（f）$\ell_1=0$の場合（$\ell_0>0.2\ell$）

＜4，4，2＞ フラッシオーバ時の極性

本実験においては、印加電圧として50Hzの交流電圧を用いている。また、試料である汚損帯も部分汚損であるから全面汚損の場合に比べて電界の不平等性が大であると考えられる。そこで、非汚損部が電極間の中央にある場合（以下、簡単のために$\ell_1=\ell_2$と表現する）、ならびに偏在している場合（以下、$\ell_1\neq\ell_2$と表現する）のそれぞれについてフラッシオーバ時の極性について調べてみた。

その結果、表4．1に平均比率で示したように、$\ell_1=\ell_2$においては高電圧側の極性が正、負ともにほぼ50％のフラッシオーバ発生率である。これに対して、電界の不平等性が大きい$\ell_1\neq\ell_2$の場合には、表4．2中に＊印で示したように、非汚損部に近い側の電極が正極性となる半波の発生率がほぼ65％となり、明らかに極性による差異が現われている。しかし、フラッシオーバ電圧の値には極性による差異は認められなかった。

表４．１　フラッシオーバ時の極性（$\ell_1 = \ell_2$）．

汚損帯の形状（cm）					データ数			比率（％）	
ℓ	b	ℓ_0	ℓ_1	ℓ_2	N	＋	－	＋	－
10	5	1	4.5	4.5	68	37	31	54.4	45.6
		2	4	4	71	28	43	39.4	60.6
		3	3.5	3.5	159	82	77	51.6	48.4
		5	2.5	2.5	65	30	35	46.2	53.8
	7.5	2	4	4	60	26	34	43.3	56.7
		3	3.5	3.5	83	53	30	63.9	36.1
		5	2.5	2.5	111	56	55	50.5	49.5
	10	3	3.5	3.5	63	31	32	49.2	50.8
		5	2.5	2.5	116	61	55	52.6	47.4
							平均	50.1	49.9

表４．２　フラッシオーバ時の極性（$\ell_1 \neq \ell_2$）．

汚損帯の形状（cm）					データ数			比率（％）	
ℓ	b	ℓ_0	ℓ_1	ℓ_2	N	＋	－	＋	－
10	5	2	* 2	6	132	85	47	* 64.4	35.6
			6	* 2	310	121	189	39.0	* 61.0
			* 0	8	108	75	33	* 69.4	30.6
			8	* 0	147	64	83	43.5	* 56.5
15	5	3	* 0	12	124	88	36	* 71.0	29.0

＊：非汚損部に近い側の電極が正となる半波

＜４．５．１＞ 流し写真による検討

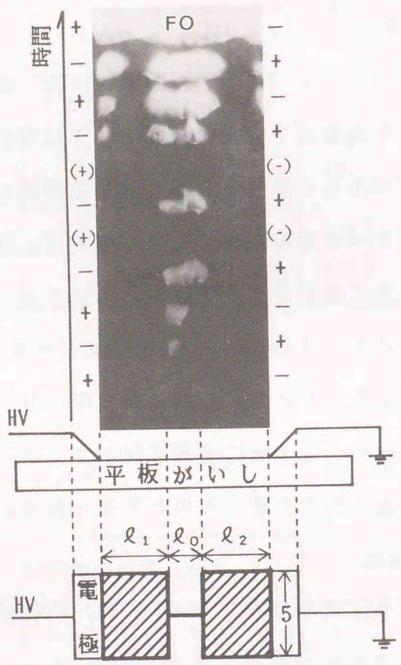
各モデルについて電圧印加からフラッシオーバまで流し写真による観測を行った。図４．７に、$\ell_1 = \ell_2$ および $\ell_1 \neq \ell_2$ の各モデルにおける測定例を示す。

【Ａ】$\ell_1 = \ell_2$ の場合

図４．７（ａ）に示すように$\ell_1 = \ell_2$ の場合には、非汚損部にある電流密度の大きな電流通路で最初に局部アーク放電が発生し、電圧の上昇に伴って消滅あるいは発生を繰り返して伸展する。その後電極端において局部アーク放電が発生し、この場合全放電長が電極間距離ℓのほぼ８２％に達した次半波においてフラッシオーバへと移行している。すなわち、$\ell_1 = \ell_2$ の場合には、中央にあるℓ_0部分に局部アーク放電が発生すると、これと両電極に対する電界の不平等性が小さくなるため、その後の伸展状況とフラッシオーバ時の極性において大きな差は現われ難いものと考えられる。

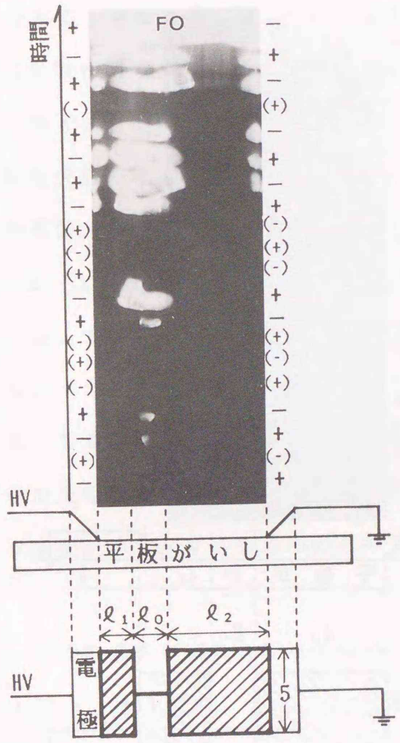
【Ｂ】$\ell_1 \neq \ell_2$ の場合

図４．７（ｂ）、（ｃ）に示すように$\ell_1 \neq \ell_2$ の場合には、電流通路部分で局部アーク放電が始発するまでは$\ell_1 = \ell_2$ の場合と同様であるが、その後の伸展状況は異なっている。すなわち、次いで生ずる局部アーク放電は非汚損部に近い側の電極端で発生する。その後、反対側の電極端においても発生するが、この伸展距離は小さい。更に電圧が上昇すると、電流通路ならびにこれに近い側の電極端で発生した局部アーク放電は一体となる。そして全放電長が電極間距離の（ｂ）図では７２％、（ｃ）図では６７％に達した次半



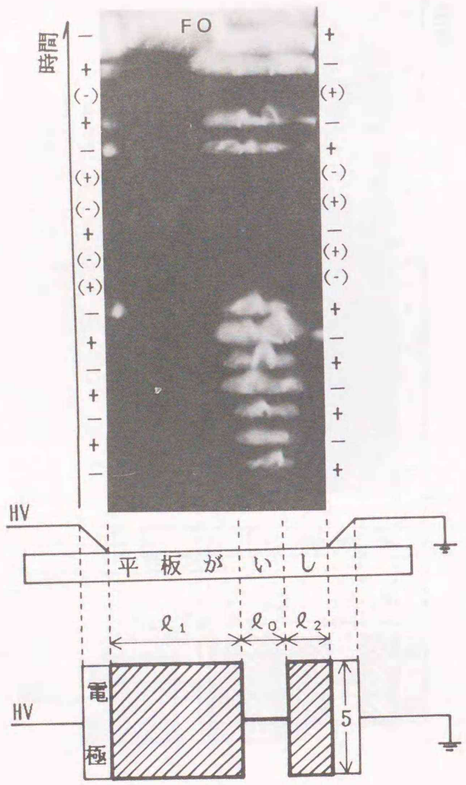
ℓ_1 = 4cm, ℓ_2 = 4cm, ℓ_0 = 2cm
B = 34.4kV/s, E_f = 0.38kV/cm
(+),(−):局部アーク放電の発生がない半波

図４．７　局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真：（ａ）$\ell_1 = \ell_2$ モデル



ℓ_1 = 2cm, ℓ_2 = 6cm, ℓ_0 = 2cm
B = 17.7kV/s, E_f = 0.34kV/cm
(+),(−):局部アーク放電の発生がない半波

図４．７　局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真：（ｂ）$\ell_1 \neq \ell_2$ モデル（$\ell_1 < \ell_2$）



ℓ_1 = 6cm, ℓ_2 = 2cm, ℓ_0 = 2cm
B = 16.2kV/s, E_f = 0.39kV/cm
(+),(−):局部アーク放電の発生がない半波

図４．７　局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真：（ｃ）$\ell_1 \neq \ell_2$ モデル（$\ell_1 > \ell_2$）

波においてフラッシオーバへ移行している。

本実験結果から、$\ell_1 \neq \ell_2$ の場合には ℓ_0 部分に近い側の電極端からの放電が支配的であることが分かった。このように ℓ_0 部分の位置によってフラッシオーバ極性に差異が生ずるのは、主として次のように考えられる。すなわち、$\ell_1 \neq \ell_2$ の場合には電圧の上昇に伴って汚損長の短い側の ℓ_0 端の電流密度が最も大きくなり、ℓ_0 に近い側の電極（（ｂ）図では高電圧側電極、（ｃ）図では接地側電極）の先端中央部の電流密度も大きくなる。このため、局部アーク放電はこの両側から伸展しやすくなる。一般に、局部アーク放電が生じた部分は、次半波においては低い電圧で再点弧する。従って、再点弧部の残部、すなわち汚損長の長い側（図４．７（ｂ）においては ℓ_2 部分、（ｃ）図においては ℓ_1 部分）の分担電圧が乾燥の伸展と共に高くなる。更に、この未放電部上の空間は、ℓ_0 部分に近い側の電極が正極性の場合に正イオン密度が大となり、プラズマ化してフラッシオーバしやすくなるものと考えられる。

＜４．５．２＞　非汚損部の存在による実効塩分付着密度

図４．３（ａ）に示したように、ℓ_0 が0.2ℓより小さい場合の $E_B - B$ 特性は全面汚損の場合と同一である。また、図４．３（ｂ）および（ｃ）のように ℓ_0 が0.2ℓを越えると最低フラッシオーバ電界強度が高くなり、更にその極小値および極小値に対応する上昇率も全面汚損時に比べて大になる。これは、非汚損部の増大に伴う付着塩分量の減少によるものと考えられる。

第２章で述べたように、汚損沿面フラッシオーバ電圧はフラッシオーバ移行時の放電空間の状態に支配される。すなわち、この放電

空間における電離電圧の低いＮａ原子の数密度に依存し、数密度が大きくなるに伴ってフラッシオーバ電圧が低くなる。このＮａ原子の供給源である汚損面の付着塩分量は局部アーク放電の発生数に伴って減少し、また空間の数密度は拡散によって時間経過と共に小さくなる。従って、Ｎａ原子数密度は拡散時間が短い局部アーク放電が連続的に各半波で発生するようなある発生数のもとで最大となる。また、この数密度は局部アーク放電が間欠的に発生する場合は拡散時間が長くなるため小さくなる。従って、間欠的に発生する場合にはフラッシオーバ電圧が高くなる。このようにフラッシオーバ電圧の高低は、これに移行する前の局部アーク放電の発生状態に大きく支配されることになる。

一方、本研究で用いた不平等汚損モデルにおいては、電流通路部分で放電が始発し、この局部アーク放電の伸展によってフラッシオーバに至る。従って、この放電通路にℓ_0という非汚損部があるので、その局部アーク放電の通路上の実効的な塩分付着密度が減少し、また、放電空間のＮａ原子数密度が小さくなる。

そこで、このような場合の実効塩分付着密度w_eを決定するため、前述の実験式（４．１）～（４．３）の塩分付着密度をいかにすると実測値に一致するかについて検討を行う。すなわち、w_eについて次の２方式が考えられる。

［Ⅰ］$w_e = w \times (\ell - \ell_0) / \ell$ .....（４．４）

とした場合、および$\ell_0 = 0.2\ell$までは全面汚損の場合と同等であることから、

［Ⅱ］$w_e = w \times (\ell - \ell_0) / (0.8\ell)$ .....（４．５）

このw_eを全面汚損時における（４．１）～（４．３）式に代入してBℓ、EℓおよびE_0を求めた。ここでは、方式［Ⅰ］によるBℓ、Eℓ、E_0をそれぞれBℓ′、Eℓ′、E_0'、また方式［Ⅱ］によるものはBℓ″、Eℓ″、E_0''と表わして、全面汚損時と区別する。

図４．３（ｂ）および（ｃ）には、これらに基づく$E_B - B$特性直線を示した。（ｂ）図においては、全面汚損時との差は小さいが、方式［Ⅰ］よりはむしろ方式［Ⅱ］によりw_eを計算した方が実測の$E_B - B$特性をよく表わすことが分かる。（ｃ）図においては、この傾向がさらに顕著に現われている。更に、図４．５の直線および図４．６（ｆ）の直線②はすべて方式［Ⅱ］による実効塩分付着密度w_eをもって計算したものであり、実測の$E_B - B$特性をよく表わしている。

さて、$w_e = w \times (\ell - \ell_0) / (0.8\ell)$が成り立つ主因としては次のように考えられる。すなわち、前述の流し写真においてフラッシオーバへ移行する一半波前の局部アーク放電の長さと電極間距離との比が、図４．７（ａ）、（ｂ）、（ｃ）ではそれぞれ８２％、７２％、６７％である。従って、残部の通路の塩分はあまり放電空間のＮａ原子数密度の増大にはならない。つまり、全面汚損の場合においても約０．２ℓの塩分はフラッシオーバへ移行するための放電空間におけるＮａ原子数密度にあまり寄与していないものとみなすことができる。従って、方式［Ⅱ］による実効塩分付着密度が実状に合っているいるものと考えられる。

４．６　まとめ

以上の結果をまとめると、

（１）電流通路をもつ非汚損部の長さℓ_0が電極間距離ℓの２０％までは、非汚損部が電極間のどこにあっても、最低フラッシオーバ電界強度E_Bは電圧上昇率Ｂに対して全面汚損の場合と同様な特性を示す。

（２）非汚損部の長さℓ_0が０．２ℓを越えると、極小フラッシオーバ電界強度E_ℓおよびそれを生ずる上昇率B_ℓはℓ_0の増大に伴って大になる。これは、非汚損部の存在により局部アーク放電の通路上の実効的な塩分付着密度が減少するため放電空間のＮａ原子数密度が小さくなるためと考えられる。そこで、塩分付着密度ｗを実効塩分付着密度$w_e = w \times (\ell - \ell_0) / (0.8\ell)$として全面汚損時の実験式から$B_\ell$、$E_\ell$および$E_0$を計算すると、これらの値はいずれも実測値とほぼ一致することが分かった。

（３）第(1),(2)項の結果、およびフラッシオーバ移行時の流し写真による観測所見から、全面汚損の場合においても約０．２ℓに対応する部分の塩分はフラッシオーバへ移行するためのＮａ原子の蒸発・飛散にあまり寄与していないものとみなすことができる。

（４）全面汚損の場合と同様に、汚損幅ｂが小さくなるに伴って、同一Ｂに対するE_Bが高く、またB_ℓが$b^{-0.5}$に比例して大きくなる傾向が現われている。

（５）フラッシオーバ時の高電圧側電極の極性は、非汚損部が電極間の中央にある場合には正極性、負極性ともほぼ５０％である。これに対して中央から偏在している場合には、非汚損部に近い側の

電極が正となる半波におけるフラッシオーバの発生率が高くなる。しかし、フラッシオーバ電圧には極性による差異が認められなかった。

一般に、送変電設備のがいしがフラッシオーバ事故を起こすと、事故がいしや近くに設置したパイロットがいしなどから事故時の塩分付着密度を推定する方法がとられている。この場合、がいし全面の付着塩分量から平均的な塩分付着密度を求めることになる。従って、本実験のような不平等汚損の影響は不明のままである。本実験結果によれば、がいし全体での平均的な塩分付着密度は小さくても、局部的に高い付着密度部分が存在しこれらが細い電流通路で連結された場合にはフラッシオーバ電圧が著しく低下し得ることが明らかとなった。なお、本実験は同一がいし面上の不平等汚損を対象としているが、実用がいし連を構成する個々のがいしの塩分付着密度が極端に異なる場合にも同様な考え方ができよう。

参考文献

（１） 電気学会：「がいしの人工汚損試験法について」、電気学会技術報告（Ｉ部）第75号、p.23（昭41）

（２） 成田・赤上・佐藤・五十嵐：「がい子汚損面のＮａの分析」原研共同利用研究経過報告書、UTRCN-G-8, p.49(1978)

（３） 成田・赤上・佐藤・五十嵐：「がい子汚損面のＮａの分析」昭和54年度電気関係学会東北支部連合大会、No.1A15

（４） H.H.Woodson & A.J.McElroy,"Insulators with Contaminated Surfaces, PartⅢ: Modeling of Dry Zone Formation", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89, No.8, p.1868(1970)

（５） P.Claverie,"Predetermination of the Behaviour of polluted Insulators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-90, No.4, p.1902(1971)

（６） 河村・伊坂：「がいし汚損面の吸湿密度、漏れ電流およびフラッシオーバ電圧の湿度依存性」、電気学会論文誌 B-93, 9, p.426(昭48)

（７） 電気学会：「がいしの人工汚損試験法について」、電気学会技術報告（Ｉ部）第75号、p.23（昭41）

（８） 加賀・佐藤・赤上：「部分汚損時の交流沿面アークの特性」昭和55年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2B8

（９） 佐藤・加賀・赤上：「方形モデル汚損帯における部分汚損時のフラッシオーバについて」、昭和60年電気学会全国大会、No.1049

（10） 佐藤・加賀・赤上：「方形モデル汚損帯における不平等汚損時の交流フラッシオーバ電圧特性」、昭和61年全国大会、No.1078

（11） 佐藤・加賀・赤上：「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」、電気学会論文誌 A-107, 2, p.57(昭62)

（12） 佐藤、加賀、赤上：「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」、電気学会論文誌 A-104, 3, p.131（昭59）

第５章　実用がいし類を模擬した台形汚損帯における交流フラッシオーバ特性

５．１　まえがき

実際の送変電設備においては、送電電圧や設置される地域の汚損区分[1]によってがいしの種類や個数は異なるが、複数のがいしを連結して「がいし連」として使用する。課電状態のがいし連は、不平等な汚損や湿潤のため各がいしの分担電圧が異なっている[2]。前章で述べたように、個々のがいしもまたその形状と不平等汚損によって電極間の電流密度分布が異なっている。従って、がいし連は不平等な電流密度分布をもつがいしが複数個連結されていることになる。また、従来実用がいしにおいては同一漏れ距離ならば円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低いという報告[3]があるにもかかわらず、その理由は明らかにされていない。このようなことから本章では、電流密度分布が不均一な汚損帯が複数個連結されている場合のフラッシオーバ特性について検討を行った[4]～[7]。

本章においては、がいし連を構成する１個の円板形がいしおよび長幹がいしの１組の胴部と笠部を、１つの台形状汚損帯で模擬することにした。すなわち、台形汚損帯は狭幅部の電流密度が高く、この部分の汚損層の乾燥が早いため局部アーク放電が発生しやすくなる。ところで、実用がいしにおいても狭幅部が存在し、従って台形汚損帯は実用がいしとの類似性があるものとみなされる。このような台形汚損帯の特徴をもとに、同一汚損長の円板形がいし連と長幹がいしとの比較のためのモデル実験を行った。ここでは、簡単のため同一の台形汚損帯を数個連結させて、その連結部に金属板を置いたものを円板形がいし連モデルとし、また金属板を置かないものを長幹がいしモデルとした。実験は、前章までの全面が平等に汚損された方形汚損帯の結果[8][9]や不平等に汚損された方形汚損帯の結果[10]～[12]と対比するため、電圧上昇法[13]により行った。

本章では、第３章で述べた方形汚損帯における実験式に基づき、フラッシオーバ電界強度が極小値E_ℓとなる上昇率B_ℓの実験式を求めるとともに、E_ℓとなる局部アーク放電の連続発生波数N_ℓを概算している。

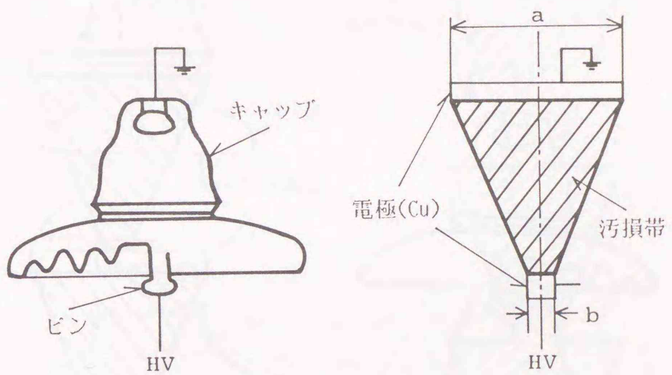
５．２　実験の概要

＜５．２．１＞ 台形汚損帯

屋外用高圧がいしの種類は数多いが、大きく分けると円板形がいしと長幹がいしになる。図５．１（ａ）と図５．２（ａ）にはそれぞれ円板形がいしユニットおよびその連結図を、図５．３（ａ）には長幹がいしの代表的な形状を示した。

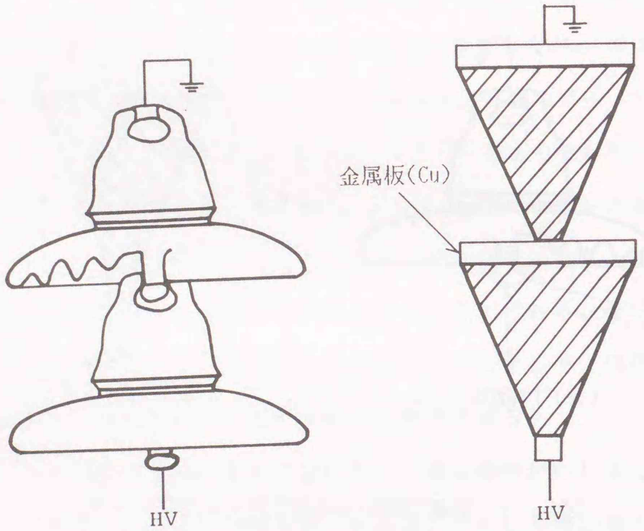
実用がいしの表面の電流密度は各部で大きく異なっている。円板形がいしはピン部の周辺の電流密度が高く汚損層の乾燥が早いため放電が発生しやすく、外周部にいくほど電流密度は低くなる。また、長幹がいしは胴部の電流密度が笠部より大きく放電が発生しやすい。ここでは、円板形がいし１個を図５．１（ｂ）にハッチングを施して示すような台形で模擬することにした。この台形はまた、長幹がいしでは１組の胴部と笠部に対応するものと考えられる。従って、この台形汚損帯ユニットを数個直列にすることによって、円板形がいし連あるいは長幹がいし連を特徴的に表現できる。

ところで、同一漏れ距離の円板形がいし連と長幹がいし連とではがいし連結数に大きな差が生ずる。それは、がいし１個の漏れ距離が長幹がいしの方が長いためである。従って、電力線と接地線に接続される両電極間の金属電極すなわちキャップとピンの数が円板形がいし連の方が長幹がいし連より多くなる。本章ではこの点を特徴的に表すため、円板形がいし連のモデルとしては図５．２（ｂ）のように連結部に金属板（Cu）を置き、長幹がいしのモデルとしては図５．３（ｂ）のように金属板を置かなかった。



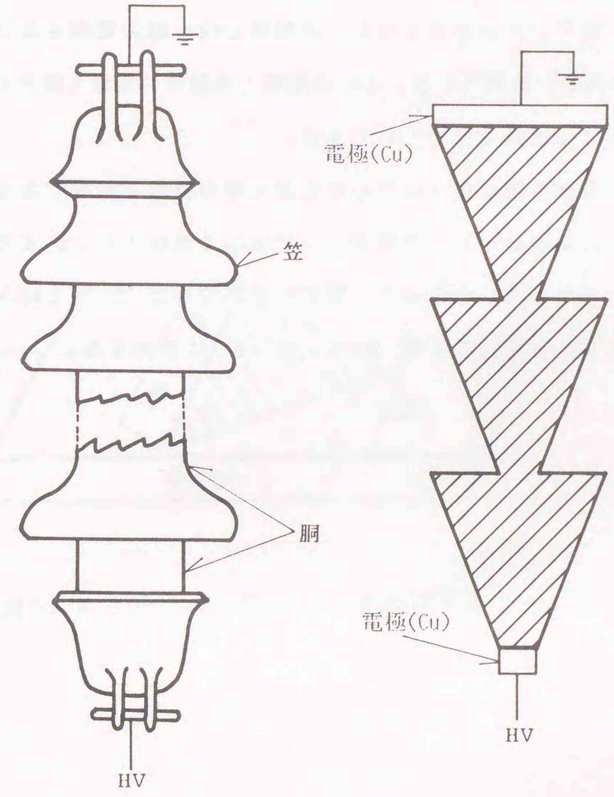
（ａ）円板形がいし　　（ｂ）台形モデル

図５．１　円板形がいしの形状とその台形モデル



（a）円板形がいし連　　（b）台形モデル

図５．２　円板形がいし連の形状とその台形モデル
（ユニット数ｎ＝２の場合）



（a）長幹がいし　　（b）台形モデル

図５．３　長幹がいしの形状とその台形モデル（ユニット数ｎ＝３の場合）

＜５．２．２＞ 実験方法

実験装置は第３章の図３．１と同様である。

あらかじめ３０℃に保持した１９cm×８cm×２cm の磁器がいしを３０度に傾けて設置し、これに汚損液を飽和するまでスプレーする。次に、汚損液の流動がおさまった時点で台形汚損帯モデルを作製する。図５．４に示すように、汚損帯と同一幅の電極を３０度の角度で汚損帯に接触させる。これは電極と汚損帯の接触を確実にし、かつ汚損液の流動を防ぐためである。

以下の実験手順は第３章ならびに第４章の実験と同様である。

なお、汚損液はイオン交換水１ℓに対して食塩１６０g とカオリン４０g を用いた。この場合の塩分付着密度wは ０．４５mg/cm^2、またカオリン付着密度kは ０．１１mg/cm^2 に相当する。

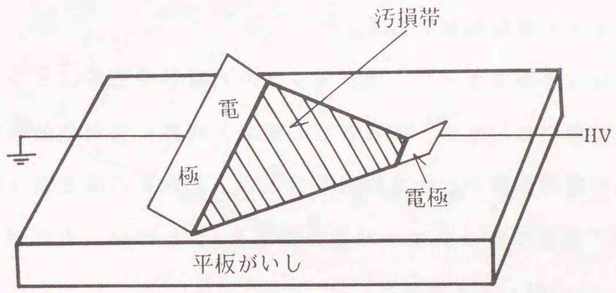


図５．４ 平板がいし、電極および汚損帯の配置

5．3　実験結果

＜5．3．1＞ 最低フラッシオーバ電界強度E_B

図5．5に、実験結果の一例として台形1個のフラッシオーバ電界強度と電圧上昇率との関係を示した。本章においては、漏れ距離の異なる各汚損モデル間の比較のため、フラッシオーバ電圧V_fの代りにフラッシオーバ電界強度E_fを用いる。すなわち、フラッシオーバ電界強度E_fは $E_f \equiv (V_f - V_E)/(n\ell)$ となる。ここで、V_Eは「電極降下電圧」[14][15]、ℓは台形汚損帯1個の漏れ距離で、nはその連結個数である。

図5．5から分かるように、フラッシオーバ電界強度のばらつきは大きい。本章においても、前章までの研究と同様に実測の最低フラッシオーバ電界強度について検討を行った。これらの測定点（●印）を単に「最低フラッシオーバ電界強度E_B」と呼び、それ以外の測定点E_f（○印）と区別する。

電界強度E_Bは電圧上昇率Bの増大に伴って低下し、ある上昇率B_ℓにおいて極小値E_ℓとなる。B_ℓを越えて更にBが大になるとE_Bは上昇に転ずる傾向を示している。このような台形モデルの最低フラッシオーバ電界強度E_Bの電圧上昇率Bに対する依存性は、方形汚損帯を用いた平等汚損[9]および不平等汚損[12]の場合と同様である。図中の実線は、$B \leqq B_\ell$における$E_B - B$特性を表す実験式であり、これについては＜5．4．3＞項で述べる。

＜5．3．2＞ 長幹がいしモデル

次に、台形汚損帯ユニットを数個連結した場合の最低フラッシオ

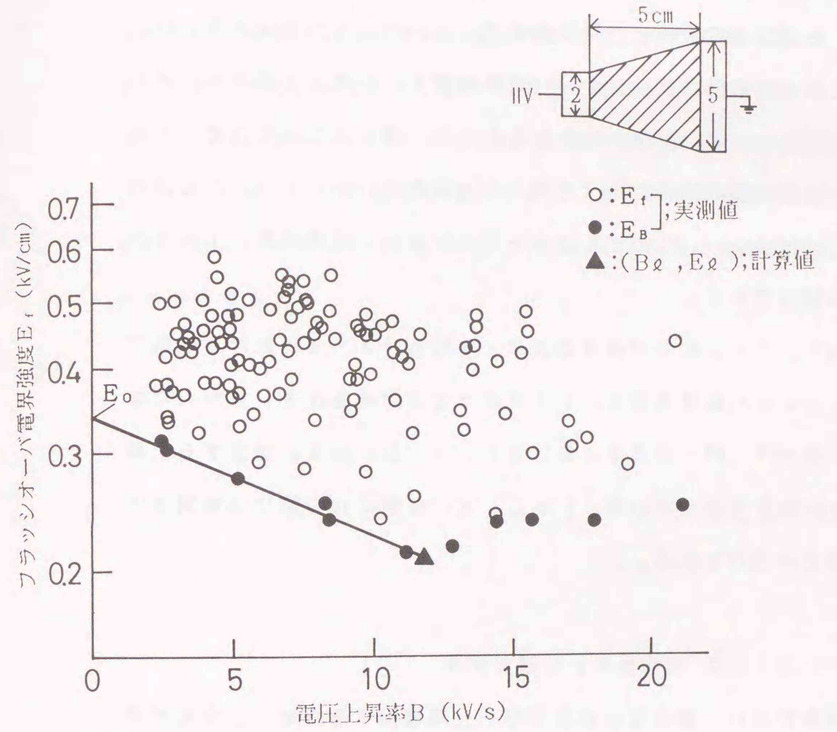


図5．5　台形モデルにおけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Bとの関係
（ユニット数n＝1の場合）

ーバ電界強度E_Bについて、長幹がいしモデル（図５．３）を用いて検討する。

図５．６に、ユニット数ｎ＝２におけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Ｂとの関係を示す。E_fのばらつきは大きいが、本モデルの最低フラッシオーバ電界強度E_Bも電圧上昇率Ｂに対して依存性を示す。同図から分かるように、測定点の分布密度からみると台形１個の場合に比べて同一の上昇率Ｂに対してE_Bの近傍の測定点が少ない。このことは本モデルにおいては連結数によらず共通の特性である。

図５．７に、台形汚損帯のユニット数ｎ＝２～４における最低フラッシオーバ電界強度E_Bと上昇率Ｂとの関係を示す。ｎが大になるに伴って、同一上昇率におけるE_Bと、極小値E_ℓが生ずる上昇率B_ℓが大になっている。しかし、E_ℓの値はｎの値には無関係のようにみうけられる。

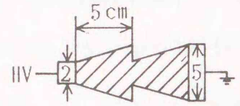
＜５．３．３＞ 円板形がいし連モデル

円板形がいし連の電流密度分布を大略模擬するために、台形汚損帯ユニットの連結部に金属板（Cu）を設けた。図５．８に、ユニット数ｎ＝２におけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Ｂとの関係を示す。最低フラッシオーバ電界強度E_Bの測定点の分布密度は長幹がいしモデル（図５．６参照）のそれに比べると大であることが分かる。

図５．９は台形ユニット数ｎ＝２とｎ＝３の場合の結果である。この場合も、最低フラッシオーバ電界強度E_Bは電圧上昇率Ｂに対して依存性を示し、長幹がいしモデルと同様なE_B、B_ℓおよびｎ

との関係を示す。

図５．１０は、台形ユニット数ｎ＝２の場合のE_B－Ｂ特性を長幹がいしモデルと比較して示したものである。長幹がいしモデルと比べて、上昇率Ｂのそれぞれの値に対してE_Bがやや低く現れていることが分かる。すなわち、同一汚損長の場合には円板形がいし連モデルの方が長幹がいしモデルに比べて同一の上昇率Ｂに対して低いフラッシオーバ電界強度が現れやすく、またその最低値E_Bがやや低くなることが分かった。このことついては次節で放電特性の面から考察する。



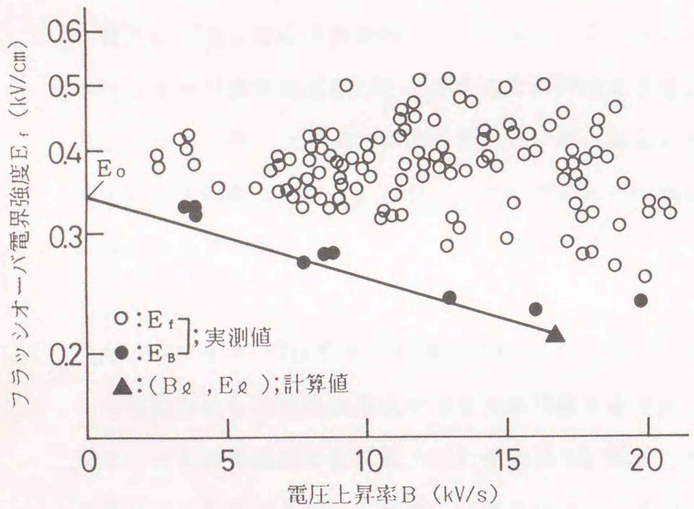
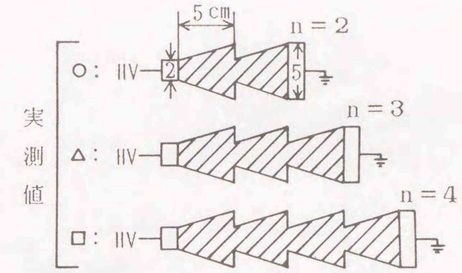


図５．６　長幹がいしモデルにおけるフラッシオーバ電界強度E_fと
電圧上昇率Bとの関係（ユニット数n＝２の場合）



▲:(B_ℓ , E_ℓ);計算値

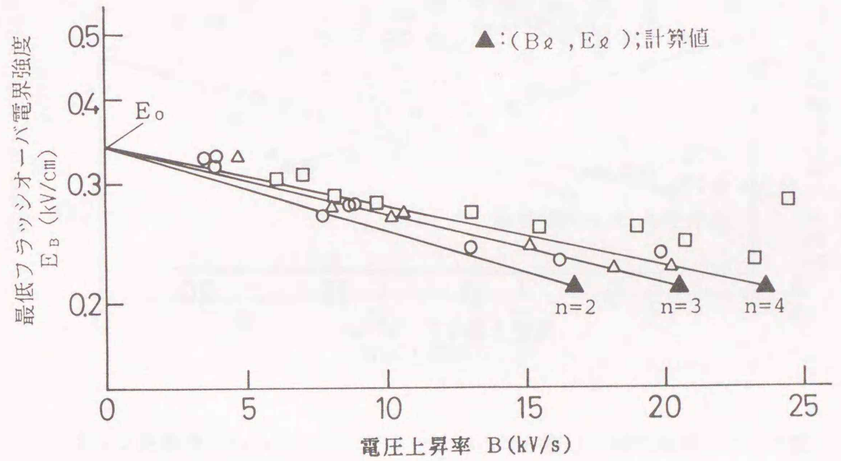


図５．７　長幹がいしモデルにおける最低フラッシオーバ電界強度E_Bと
電圧上昇率Bとの関係（ユニット数n＝２～４の場合）

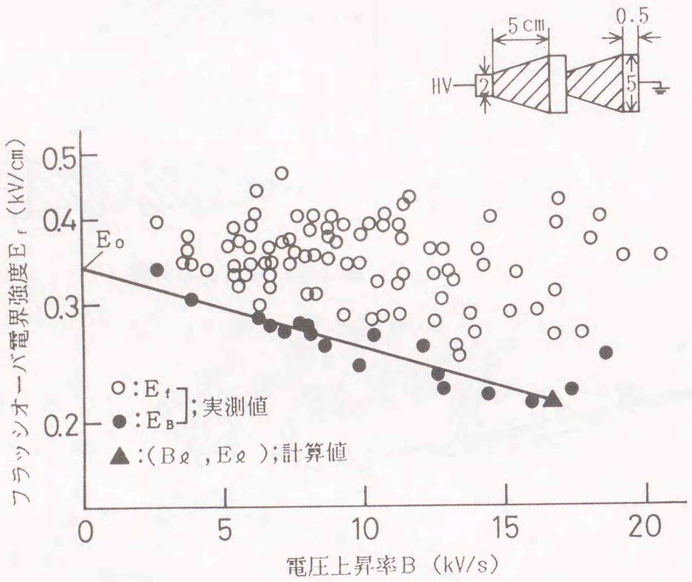


図５．８　円板形がいし連モデルにおけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Bとの関係（ユニット数n＝２の場合）

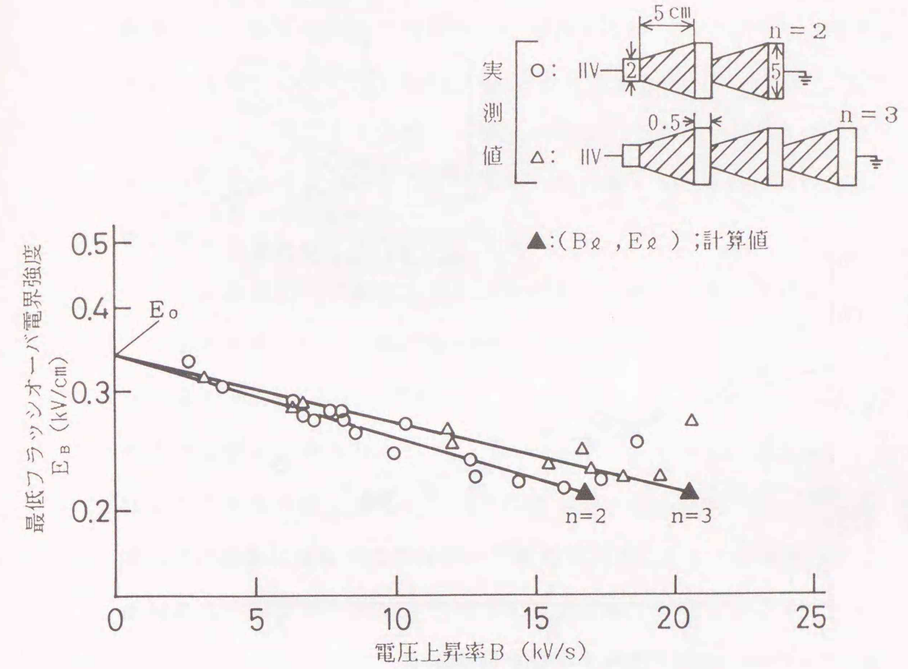


図５．９　円板形がいし連モデルにおける最低フラッシオーバ電界強度E_Bと電圧上昇率Bとの関係（ユニット数n＝２，３の場合）

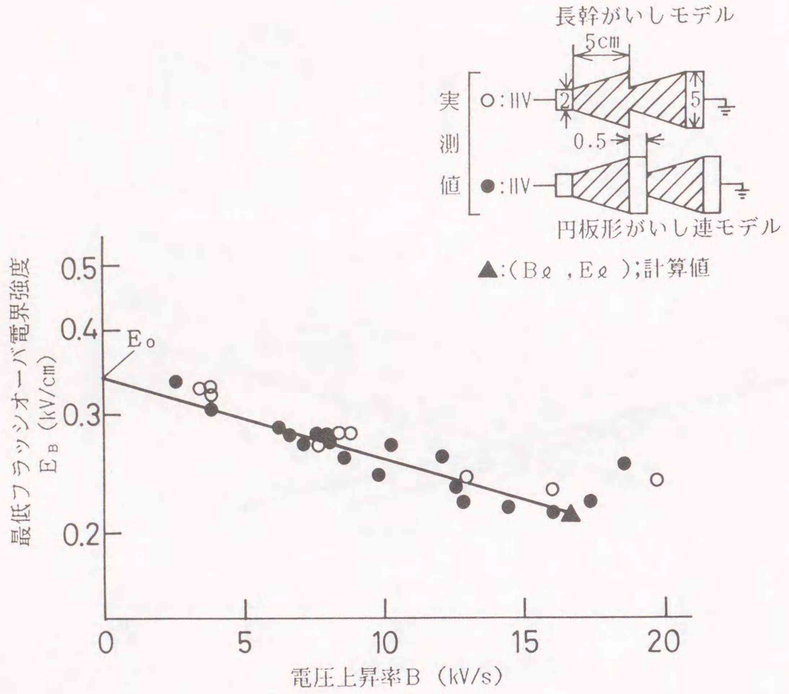


図５．１０　同一汚損長をもつ長幹がいしモデルと円板形がいし連モデルのE_B－B特性の比較（ユニット数ｎ＝２の場合）

５．４　考察

前述のように、交流課電時の汚損沿面フラッシオーバは半波毎の局部アーク放電の発生と伸展あるいは消滅の繰り返しに伴って生ずる。このため、課電中の局部アーク放電の発生数や発生位置がフラッシオーバ電圧に大きく影響する。特に電圧の印加が上昇法による場合には、その上昇率によって局部アーク放電の発生状況が異なるものと考えられる。そこで、ここでは、

（ｉ）局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの経過

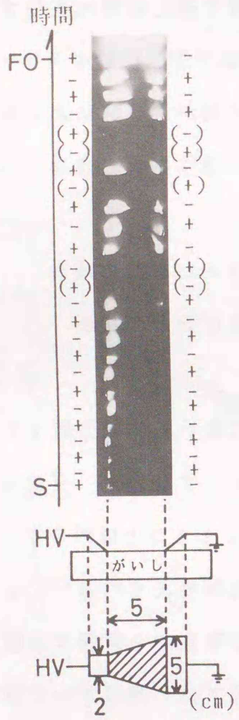
（ii）局部アーク放電の発生波数とE_BおよびＢとの関係

（iii）E_B－Ｂ特性の実験式

の３つの観点から考察を行う。なお、（ii）において「発生数」ではなく「発生波数」としたのは次の理由による。すなわち、交流半波内で汚損面に発生する局部アーク放電は必ずしも１つとは限らず、直列あるいは並列に何個か同時に発生する場合が考えられる[16]。しかし、これらを電圧、電流波形あるいは流し写真から厳密に分離することは著しく困難である。このため本研究では、局部アーク放電が１つ以上発生した半波の数を検討の対象とすることにした。

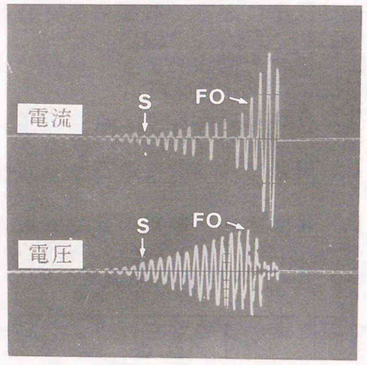
＜５．４．１＞ 放電の挙動

【Ａ】台形ユニット　　図５．１１に台形ユニットの、（ａ）課電中の局部アーク放電の流し写真と、（ｂ）そのときの電圧、電流波形のオシログラムを例示する。（ｂ）図から分かるように、電圧が点Ｓに達するまでは電圧の上昇に伴って電流が増大している。従って、この電流は汚損面を流れる漏れ電流である。点Ｓにおいて電流



(+),(-):局部アーク放電の
発生がない半波

（ａ）流し写真



v:2.8kV$_{rms}$/div
i:1.4A$_{rms}$/div
t:0.1s/div

（ｂ）電圧、電流波形

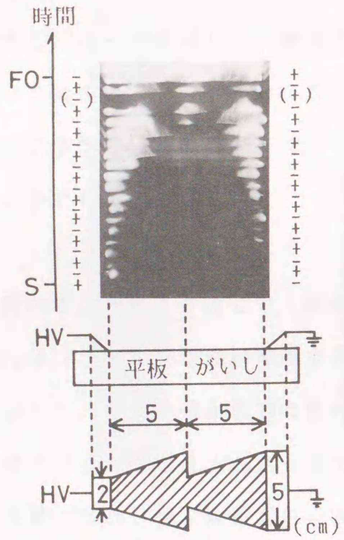
図５．１１　台形モデルの局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真と電圧、電流波形

は突然小さくなり、（ａ）図の流し写真にも発光が見られるようになる。実際には、点Ｓ以前にも電極近傍に淡青色の弱い発光が観測される場合がある。しかし、これらの放電の消費電力は、この放電時間内で汚損面の水分を蒸発させるには不十分である。これに対して点Ｓ以降の放電は、強い発光を伴う局部アーク放電である。このため著者らは、実質的な放電開始点をこのＳ点で示される半波とした。点Ｓ以降の電流は電流ゼロ区間が現れる局部アーク放電を伴う典型的な交流汚損沿面放電波形となり[17]、また電圧の上昇に伴って波高値が大になる。

放電は初め点Ｓで高電圧側電極の先端、すなわち台形汚損帯の狭幅部で発生し、その後数半波遅れて接地側電極端で発生している。これは台形の狭幅部は電流密度が高いため電力消費が大で、この部分の汚損層の乾燥速度が他に比べて大きいためである。これらの局部アーク放電は半波毎に発生と伸展あるいは消滅を繰り返して最終的にフラッシオーバへと進展している。（ａ）図で発光のない半波は（ｂ）図のオシログラムにも電流が現れていない。従って、この半波では放電による電流も漏れ電流も流れていない。

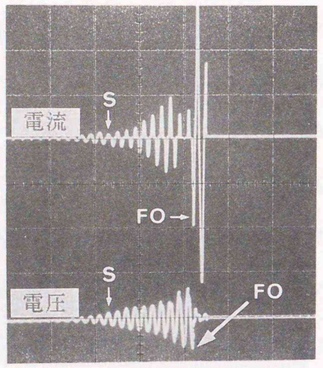
図５．１１の例では、フラッシオーバ半波前の全放電長は電極間距離の約７０％である。本研究においてはフラッシオーバ半波前の全放電長が５０％以下のデータは皆無であり、これはまた Alston 氏ら[16] による臨界長５７％とほぼ一致している。

【Ｂ】長幹がいしモデル　　図５．１２に、ユニット数ｎ＝２の場合の長幹がいしモデルの、（ａ）流し写真と、（ｂ）電圧、電流波形のオシログラムを示す。ｎ＝１の場合（図５．１１）と同様に、高電圧側電極の先端から局部アーク放電が始発し、その後接地側電



(+),(-):局部アーク放電の発生がない半波

（ａ）流し写真



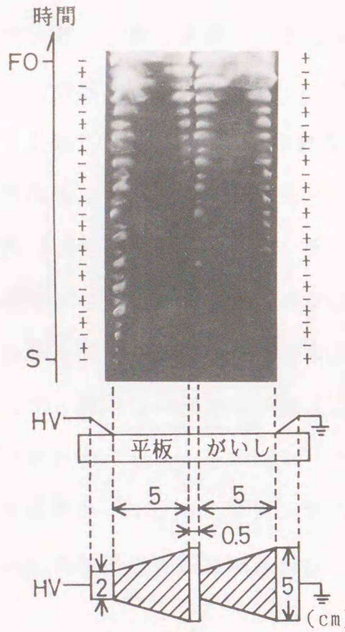
v :7.1kV$_{rms}$/div
i :1.4A$_{rms}$/div
t :0.1s/div

（ｂ）電圧、電流波形

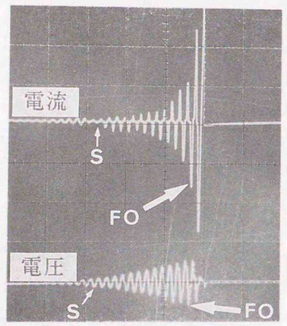
図５．１２　長幹がいしモデルの局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真と電圧、電流波形（ユニット数ｎ＝２の場合）

極端および両ユニットの連結部で放電が発生している。台形汚損帯ユニットを連結した場合には、高電圧側電極から始発した放電が接地側電極まで伸びてフラッシオーバするのではなく、各ユニットで発生した放電がほぼ同時に伸展してフラッシオーバへ至っている。このことは、実用長幹がいしのフラッシオーバ現象と著しい類似性を示す。すなわち、長幹がいしは図５．３（ａ）のように複数個の笠と胴を持つ構造をしている。がいし表面の電流密度は胴部で高く、通常いずれかの笠下面の胴部で局部アーク放電が始発する。どの笠下面の胴部で放電が始発するかは全くランダムである。しかし、たとえどの笠下面で放電が始発したとしても、その放電ががいし全体を伸展してフラッシオーバに至るのではない。それぞれの笠下面に局部アーク放電が発生した後、各笠の上面へほぼ同時に伸展してフラッシオーバに至る。すなわち、本モデルの台形ユニットが長幹がいしの１組の笠部と胴部に対応すると考えれば、本モデルの局部アーク放電の発生からフラッシオーバへの伸展状況は実用長幹がいしのそれに著しく類似している。

【Ｃ】円板形がいし連モデル　　図５．１３に円板形がいし連モデルのユニット数ｎ＝２の場合の（ａ）流し写真と、（ｂ）電圧、電流波形のオシログラムを示す。台形ユニットおよび長幹がいしモデルと同様に、放電は高電圧側電極端で始発している。その後、接地側電極端と、両ユニットの連結部にある金属板でほぼ同時に放電が発生している。このように台形ユニットの連結部で長幹がいしモデルに比べて低い電圧のもとで放電が発生することと、その放電がフラッシオーバまでの各半波で連続に発生することが本モデルの特徴である。また、本モデルにおいても、各ユニットの放電がほぼ同



（ａ）流し写真



v:7.1kV$_{rms}$/div
i:1.4A$_{rms}$/div
t:0.1s/div

（ｂ）電圧、電流波形

図５．１３　円板形がいし連モデルの局部アーク放電の発生からフラッシオーバまでの流し写真と電圧、電流波形（ユニット数ｎ＝２の場合）

時に伸展してフラッシオーバに至っていることが分かる。

＜５．４．２＞ フラッシオーバ電圧が低下する要因

同一ユニット数の長幹がいしモデルと円板形がいし連モデルでは漏れ距離は等しいが、電極間距離は後者の方が連結部にある金属板の分だけ長い。それにもかかわらず、円板形がいし連モデルでは長幹がいしモデルに比べて低い最低フラッシオーバ電界強度E_Bが現れやすい。このことは、実用がいしにおけるフラッシオーバ電圧特性と類似している。なぜなら、実用がいしにおいては同一漏れ距離ならば円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低いという報告がある[13]。しかし、その原因については検討されていない。ここではこの点について放電特性から検討してみよう。

先に著者は霧室内で、全面汚損を施した方形汚損帯（汚損長３cm、幅１cm、塩分付着密度０．２８mg/cm^2）を用いて、次のような条件のもとで汚損沿面アーク放電の分光分析を行った[18]。測定には、イメージコンバータカメラ、イメージインテンシファイアおよび透過型平面回折格子を使用した。

（ａ）直流電圧を上昇法（１kV/s）で印加する（約５kVでフラッシオーバした）。静止像を得る。

（ｂ）幅１μs、立ち上がり３０ns で波高値が２８kVのパルス電圧を印加する。ストリーク像を得る。

（ｃ）一定の直流（(a)のフラッシオーバ電圧よりわずかに低い値）を印加してから汚損面の吸湿をまってパルス電圧を印加する。ストリーク像を得る。

その結果、（ａ）の場合の静止像にはＮａ原子のＤ線（589nm）

が最も強く現れた。また（ｂ）のパルスのみの場合には電極（Cu）線やＨ原子、Ｎ原子に近いスペクトルが現れたが、Ｄ線が観測されなかった。これに対して、（ｃ）の場合にはパルス印加後１μs程度からＤ線が現れ、徐々に発光強度を増していく様子が観測された（装置の制約上４０μsまで測定）。

一方、第２章において汚損がいし面上の再点弧電圧特性について述べた。これは、一定の交流電圧を印加した乾燥汚損帯を加湿した場合に、半波毎に繰り返すフラッシオーバ（再点弧）に関する研究結果である[10][11]。試料である汚損帯は方形で、全面汚損および一部が非汚損の不平等汚損である。また、比較のため平板がいし面上で電極間の全面が非汚損の場合についても実験を行った。主要な結論は次の通りである。

（ｉ）いずれの汚損条件においても、再点弧電圧V_rは再点弧の繰り返しと共に低下し、ある繰り返し数で最低値V_Rとなる。更に繰返し数が大になるとV_rは上昇に転ずる。

（ii）再点弧電圧の値とその時間変化は汚損帯の塩分付着密度に依存する。

以上の二つの実験は印加電圧が異なっているため、両者を単純に比較することはできない。しかし、いずれも汚損面のＮａ原子がアーク放電や再点弧（フラッシオーバ）に大きく影響を及ぼしていることが推測できる。すなわち、上述の実験結果（ｉ）、（ii）から、再点弧電圧は放電空間のＮａ原子の挙動によって著しい影響を受けるものと考えられる。なぜなら、Ｎａ原子の電離電圧はこの場合考えられる他の原子や分子のうち最も低いからである。例えば、Ｎａ原子の電離電圧V_{Na}＝５．１３９Vに対し、N_2およびO_2はそれぞれV_{N2}＝１５．５７６V、V_{O2}＝１２．２Vである[19]。本章の実験においては、フラッシオーバ前の局部アーク放電が汚損面からＮａ原子を供給する役目をする。従って、局部アーク放電の発生数が再点弧電圧特性における再点弧の繰り返し数に対応するものとみなすことができる。

そこで、台形ユニット数ｎ＝２の場合の長幹がいしモデルの局部アーク放電発生波数Ｎと電圧上昇率Ｂおよびフラッシオーバ電界強度E_fとの関係を調べてみたのがそれぞれ図５．１４と図５．１５である。両図の実測値は、いずれも図５．６のE_f－Ｂ特性と同一のデータである。

図５．１４から分かるように、ＮはＢにほぼ逆比例している。数kV/sの上昇率では、局部アーク放電の発生波数は６０～７０となる。放電の発生数が多ければそれだけ汚損面からのＮａ原子の供給量が大となろう。しかし、上昇率が小さければフラッシオーバまでの時間が長くなり、また一般に放電の発生が間欠的になるため、その間の放電空間からのＮａ原子の拡散もまた大であると考えられる。結局、図５．１５から分かるように、E_fが極小となる適当な放電の発生波数N_ℓが存在することになる。この発生波数N_ℓについては＜５．４．４＞項で概算を試みるが、図５．１４および図５．１５の例では約１３波である。

以上のことから、フラッシオーバ時の放電空間のＮａ原子数密度が増大するに伴って汚損フラッシオーバ電圧は低下し、数密度が最大になる時点で汚損フラッシオーバ電圧が最も低くなるものと推測される。電圧上昇法においては、フラッシオーバ時のＮａ原子数密度が最大となり得る電圧上昇率がB_ℓということになる。更に、上

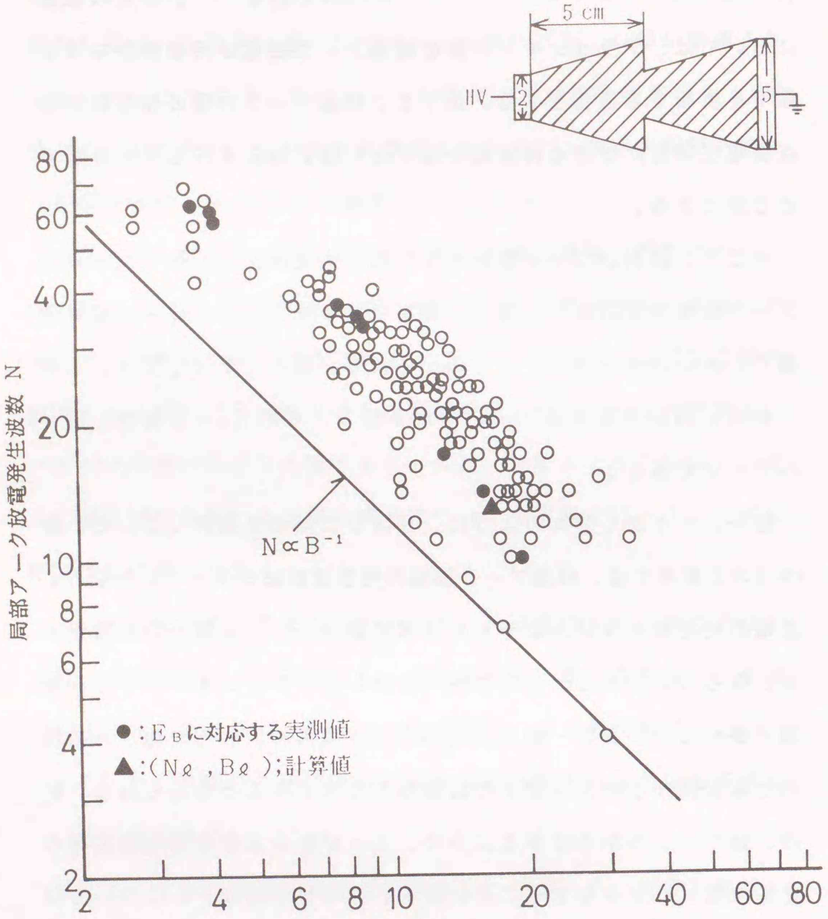


図５．１４　長幹がいしモデルの局部アーク放電発生波数Ｎと電圧上昇率Ｂとの関係（ユニット数ｎ＝２の場合）

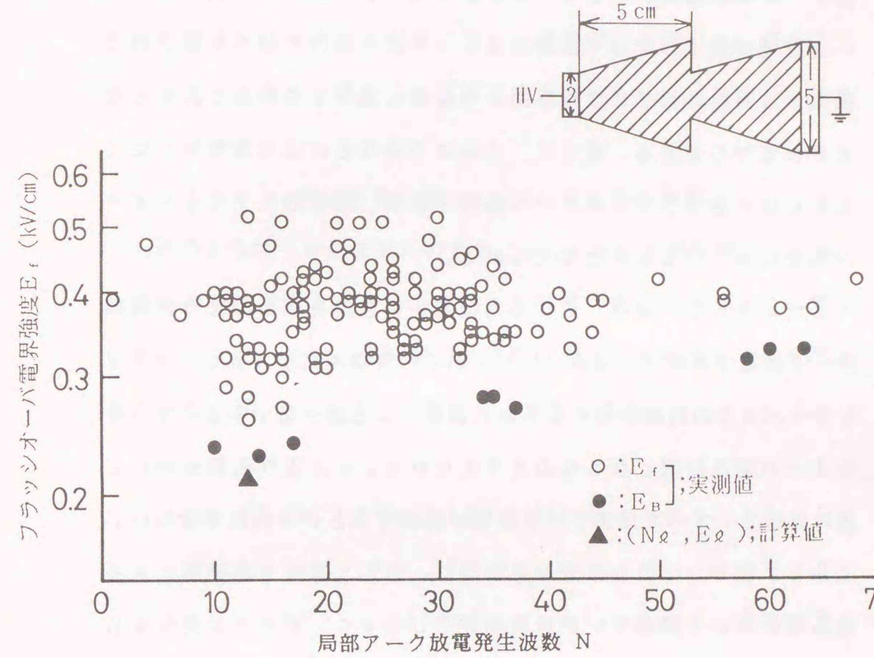


図５．１５　長幹がいしモデルのフラッシオーバ電界強度E_fと局部アーク放電発生波数Ｎとの関係（ユニット数ｎ＝２の場合）

昇率B_ℓにおいてフラッシオーバ電圧が極小値となるためには、放電はその始発からフラッシオーバまでの各半波で連続して発生しなければならない。なぜなら、例示した図５．１１の台形ユニットや図５．１２の長幹がいしモデルのようにフラッシオーバ前に局部アーク放電が発生しない半波があると、その半波内ではＮａ原子は汚損面から供給されずに放電空間から拡散し減少するのみであると考えられるからである。従って、このような場合には印加電圧が更に上昇しないとフラッシオーバへ移行できず、結果的にフラッシオーバ電圧は高くなるものと考えられる。

これに対して、図５．１３の円板形がいし連モデルのように局部アーク放電が連続する場合にはＮａ原子の累積速度が大きく、フラッシオーバまでの時間が短くなるため拡散による減少量が少なくフラッシオーバ電圧は低くなるものと考えられる。もとより円板形がいし連において、すべて局部アーク放電が連続するというわけではない。しかし、図５．１３から分かるように、台形ユニット連結部にある金属板において局部アーク放電が発生しやすく、また一旦発生すると連続しやすい。これは、アークスポットが汚損面上にある場合はアークスポット近傍の汚損成分が飛散するためアークスポットの位置が不安定になりがちであるのに対し、金属上では一定の位置に固定しやすいためと考えられる。

結局、フラッシオーバ前までの局部アーク放電が連続して発生しやすい形状である円板形がいし連モデルの方が長幹がいしモデルより最低フラッシオーバ電界強度E_Bに近い測定点が現れやすく、またその値もやや低くなるものと考えられる。実用がいしにおいては、同一汚損長のがいし連を構成する場合、がいし１個の漏れ距離が小

さい円板形がいしを用いると、長幹がいしを用いる場合より連結部（金属）が多くなる。更に、この連結部近傍のがいし面は電流密度が大である。従って、この連結部で放電が発生しやすく、また一旦発生するとフラッシオーバまで連続的に発生するものと考えられる。これが、同一汚損長では円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低くなる原因と考えられる。

＜５．４．３＞ 形状係数に基づくE_B-B特性の実験式

上述のように、台形モデルの最低フラッシオーバ電界強度E_Bは、全面が均一に汚損された方形モデルと同様な電圧上昇率Ｂ依存性を示す。そこで、すでに第３章で与えた方形モデルに関する次の関係基づいて、E_B-B特性の実験式を求めてみよう。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} b^{-0.5} \ell \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots\cdots (５．１)$$

$$E_\ell = 0.18 w^{-0.2} \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (５．２)$$

$$E_0 = 1.6 E_\ell \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (５．３)$$

ここで、B_ℓは極小フラッシオーバ電界強度E_ℓに対応する電圧上昇率、E_0はE_B-B特性上のＢ→０に対応する電界強度、ｗは塩分付着密度（mg/cm^2）、ｂは汚損層の幅（ｃｍ）であり、ℓは電極間距離（ｃｍ）である。

方形モデルにおいてもフラッシオーバ半波前の全放電長は電極間距離の５０％以上である。そこで、簡単のために、フラッシオーバ半波においては図５．１６（ａ）に示すように局部アーク放電が一方の電極から（$\ell/2$）だけ伸びてフラッシオーバへ移行するもの

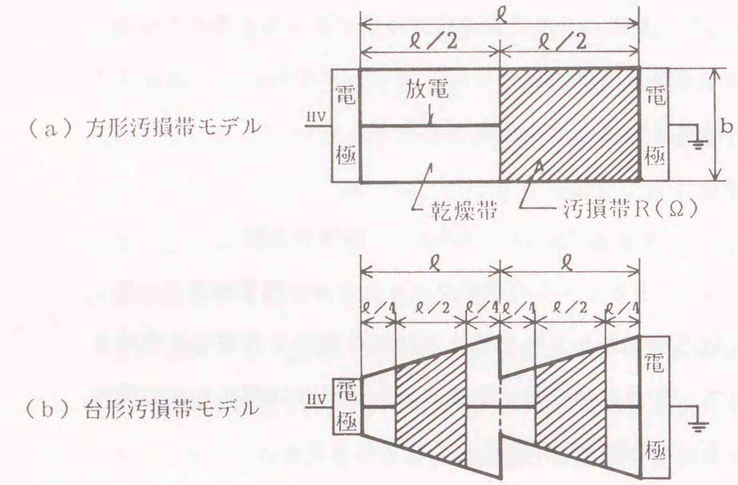


図５．１６　汚損抵抗に関連する「形状係数」を求めるための概念図

と仮定する。放電に直列な残余汚損帯（$\ell_r = \ell/2$）の抵抗Ｒは、表面抵抗率をρ_sとすると次のようになる。

$$R = \rho_s (\ell/2) / b = \rho_s F \quad (\Omega) \quad \cdots\cdots (5.4)$$

ここで、$F = (\ell/2) / b$ は汚損抵抗に関する「形状係数」と呼ばれている[20]。従って、（５．１）式は

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} F^{0.5} (2\ell)^{0.5} \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots (5.5)$$

と書き換えられる。

さて、本研究の台形汚損帯においても、B_ℓ は（５．５）式のような形式で表すことができると仮定する。いま、台形ユニットの数をｎとすると、（５．５）式から、B_ℓ は次式のように表される。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} F^{0.5} (2n\ell)^{0.5} \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots (5.6)$$

すなわち、B_ℓ を得るためには形状係数Ｆを求める必要がある。

台形モデルにおいては、図５．１２（ａ）や図５．１３（ａ）の流し写真から分かるように、フラッシオーバ半波前の局部アーク放電は両電極端および連結部の３箇所で発生している。この場合の全放電長は（$\ell/2$）を下限として種々の値をとり得る。ここでは、図５．１６（ｂ）のように各ユニットにおいて両側から（$\ell/4$）

ずつ放電が伸展する場合を考えることにする。前述のように台形ユニットが連結されている場合には各ユニットの局部アーク放電が同時に伸展してフラッシオーバに至る。従って、この場合の形状係数はユニット数に関係なく１つのユニット中の残余汚損帯について考えればよい。いま、台形ユニットの座標を図５．１６（ｃ）のように置くと、ハッチングを施した汚損帯の形状係数は、

$$F = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{D(x)} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.7)$$

となる。ここで、D(x) は位置ｘにおける台形の「実効的な幅」である。D(x)＝［（ａ－ｂ）／ℓ］ｘ＋ｂ であるから形状係数Ｆは、

$$F = \frac{\ell}{a-b}\left\{\ln\left(\frac{a-b}{\ell}x+b\right)\right\}_{x_1}^{x_2} \qquad \cdots\cdots\cdots (5.8)$$

となる。

ここで、図５．１６（ｂ）のように $x_1 = \ell/4$、$x_2 = 3\ell/4$ とおくと、形状係数Ｆは次のようになる。

$$F = \frac{\ell}{a-b}\ln\frac{3a+b}{a+3b} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (5.9)$$

従って、この場合のＢℓ は（５．６）式から次のように表される。

$$B_\ell = 2.2w^{-0.85}\left(\frac{2n}{a-b}\ln\frac{3a+b}{a+3b}\right)^{0.5}\ell \qquad (kV/s)$$

$$\cdots\cdots\cdots (5.10)$$

図５．５～図５．１０に示した実線は、（５．２）式、（５．３）式および（５．１０）式によって計算した直線である。いずれも、実測の最低フラッシオーバ電界強度Ｅｂ とよく一致していることが分かる。本研究によって、台形汚損帯においては極小フラッシオーバ電界強度Ｅℓ に対応する電圧上昇率Ｂℓ は台形ユニットの連結数ｎの（１／２）乗とその個々の長さℓに比例することが分かった。

＜５．４．４＞ 極小フラッシオーバ電界強度Ｅℓ となる局部アーク放電の発生波数Ｎℓ

＜５．４．１＞項で述べたように、電圧上昇法による汚損フラッシオーバのプロセスは次の通りである。

（ｉ）印加電圧の初期において、漏れ電流が連続的に流れる。

（ⅱ）印加電圧の上昇に伴って乾燥帯が形成され、局部アーク放電が始発する（図５．１１～図５．１３の半波Ｓ）。

（ⅲ）局部アーク放電が交流半波毎に発生と伸展あるいは消滅を繰り返しながら進展する。

（ⅳ）電極間が最終的にフラッシオーバする。

本研究では、極小フラッシオーバ電界強度Ｅℓ が生ずるためには、

段階（ⅲ）においてフラッシオーバまでの全半波で休むことなく局部アーク放電が発生する必要があると結論づけた。ここでは、この極小値E_ℓとなる局部アーク放電の連続発生波数N_ℓ[21]を計算で求めてみよう。

５．３節で述べたフラッシオーバ電界強度の定義から、極小フラッシオーバ電圧V_ℓは次式のように表される。

$$V_\ell = E_\ell L + V_E \quad (kV) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (５．１１)$$

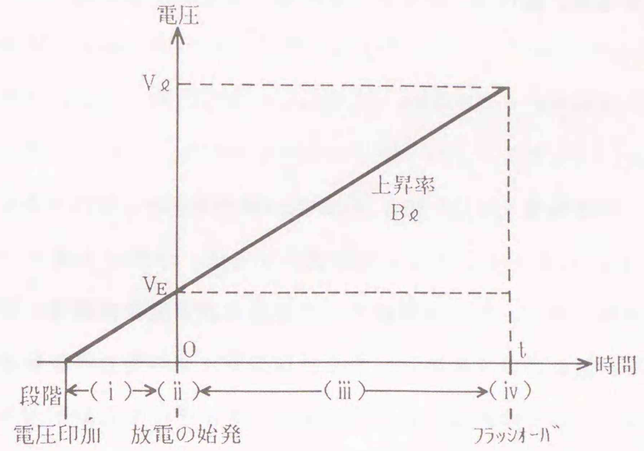
ただし、Ｌは電極間距離で$L = n\ell$(cm)、V_Eは電極降下電圧（０．８４kV）である。

いま、図５．１７に示すように、段階（ⅱ）の局部アーク放電が（５．１１）式中のV_Eに相当する電圧で始発すると仮定する。また、局部アーク放電始発後（段階（ⅲ））は、図５．１３のオシログラム中の半波Ｓ以降のように放電電流の波高値が電圧の上昇に伴って徐々に増大すると仮定する。始発からフラッシオーバまでの時間をｔ（ｓ）とすると、上昇率がB_ℓ(kV/s)であるから、

$$E_\ell \ell = t B_\ell \quad (kV) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (５．１２)$$

となる。

一方、時間 t(s) の間に局部アーク放電がN_ℓ波連続して発生することになるから、５０Hz商用周波電圧の１半波は１０ms であるので、



段階（ⅰ）印加電圧の初期において、漏れ電流が連続的に流れる。
段階（ⅱ）印加電圧の上昇に伴って乾燥帯が形成され、局部アーク放電が始発する。【図５．１１～図５．１３の半波Ｓ】
段階（ⅲ）局部アーク放電が交流半波毎に発生と伸展あるいは消滅を繰り返しながら進展する。
段階（ⅳ）電極間が最終的にフラッシオーバする。

図５．１７　電圧上昇法による汚損フラッシオーバ・プロセス

$$t = (10/1{,}000)\,N_\ell \quad (s) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5.13)$$

となる。従って、（５．１２）式、（５．１３）式から

$$N_\ell = 100\,(E_\ell\,\ell / B_\ell) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (5.14)$$

すなわち、（５．２）式のE_ℓ(kV/cm)と（５．１０）式のB_ℓ(kV/s)を（５．１４）式に代入すると、フラッシオーバ電界強度が極小値E_ℓとなる局部アーク放電の連続発生波数N_ℓが計算できる。図５．１４と図５．１５には、ｎ＝２の場合の長幹がいしモデルについての計算結果（図中▲印）を示す。本実験で得られたB_ℓ近傍のE_Bの発生波数Ｎは、N_ℓに近い値であることが分かる。

さて、本計算過程の各半波での電流値は、電圧の上昇に伴って徐々に増大することを仮定しているが、その大きさについては考慮していない。図５．１４と図５．１５の局部アーク放電発生波数の実測値についても、電流値を考慮せずに発生した半波のみをカウントしている。しかしながら、実際には各半波で局部アーク放電が連続する場合でもその電流の大きさは様々である。実際の現象においては、局部アーク放電が発生する際の電流の大きさは明らかにアークスポットの周りからの汚損成分の飛散に大きく影響する。従って、フラッシオーバ時の放電空間のＮａ原子数密度を考えるとき、局部アーク放電が発生した各半波の電流値も無視し得ない。今後、最低フラッシオーバ電界強度E_Bならびにその極小値E_ℓとなるための局部アーク放電の発生条件について更に検討するためには、この点が重要な課題となろう。

５．５　まとめ

本章では、台形状の汚損帯を１個ないし数個連結したモデルを用いて、電極間で電流密度分布が不均一な汚損がいしモデルのフラッシオーバ特性について検討を行った。特に、台形ユニットの連結部に金属板を置いた場合と置かない場合の２通りについて検討し、同一汚損長の円板形がいし連モデルと長幹がいしモデルとの比較を行った。

本章で得られた結果をまとめると、次のようになる。

（１）方形モデルと同様に最低フラッシオーバ電界強度E_Bは電圧上昇率Ｂに対して依存性を示すことが分かった。すなわち、E_BはＢの増大に伴って低下し、ある上昇率B_ℓにおいて極小値E_ℓとなる。B_ℓを越えて更にＢが大になると、E_Bは上昇に転ずる。

（２）各モデルにおけるフラッシオーバまでの局部アーク放電の発生状況を流し写真で調べた。それによると、台形ユニットの連結部に金属板を置くと（円板形がいし連モデル）、この部分の局部アーク放電は金属板がない場合（長幹がいしモデル）に比べて低い電圧で発生し、かつその放電が連続的にフラッシオーバまでの各半波で発生しやすいことが分かった。

（３）台形ユニットの連結数が同一の場合、すなわち漏れ距離が等しい場合には、円板形がいし連モデルは台形ユニットの連結部にある金属板によって局部アーク放電が連続してに発生しやすい。このため、長幹がいしモデルよりフラッシオーバ電圧が低下することを明らかにした。

（４）これによって、同一漏れ距離ならば円板形がいし連の方が

長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低いという従来の実証試験の結果を、放電特性から説明することができた。

（５）流し写真から、フラッシオーバ半波前の局部アーク放電は両電極端および台形ユニットの連結部の３箇所で発生し、その全放電長は電極間距離ℓの１/２が下限であることが分かった。また、台形ユニットが連結されている場合には、各ユニットの局部放電がほぼ同時に伸展してフラッシオーバに至ることが分かった。

（６）そこで、ユニット数に関係なく１つのユニット中の残余汚損帯について汚損抵抗に関する形状係数を求め、これに基づいて上昇率B_ℓの実験式を導いた。このB_ℓの実験式も含めた$E_\ell - B$特性の実験式は、実測の最低フラッシオーバ電界強度とよく一致している。また、極小値E_ℓとなる局部アーク放電の連続発生波数N_ℓを計算した結果、実測値に近い値が得られた。

参考文献

（１） 絶縁設計合理化専門委員会：「絶縁設計の合理化　第Ⅳ編架空送電設備の合理化」、電気協同研究、第４４巻、第３号、p.195（昭63）

（２） M.Kawai,"Flashover test at Project UHV on salt-comtaminated insulators - Part-Ⅱ",IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-89, 8 ,p.1791(1970)

（３） 塩害対策専門委員会送変電分科会(1)：「送変電設備の塩害対策」、電気協同研究、第２０巻、第２号、p.104（昭39）

（４） 佐藤・中野・加賀・赤上・岩泉・堀：「等価霧中法によるフラッシオーバ電圧の電圧上昇速度依存性」、放電・絶縁材料合同研究会資料、ED-79-42,EIM-79-63、p.11(1979)

（５） 加賀・佐藤・中野・赤上：「不平等汚損帯におけるフラッシオーバ電圧と電圧上昇速度」、昭和55年電気学会全国大会、No.1071

（６） 佐藤・加賀・赤上：「空間的にみた汚損がいしのフラッシオーバ機構」、昭和59年電気学会全国大会、No.1058

（７） 佐藤・斉藤・赤上：「台形状の汚損がいしモデルにおける交流フラッシオーバ特性」、昭和62年度電気関係学会東北支部連合大会、No.2E12

（８） A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Study of Characteristics of AC Arc Discharges on Polluted Insulator Surfaces", Jpn,J,Appl.Phys., 21, 4, p.574(1982)

（９） 佐藤・加賀・赤上：「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電

圧と電圧上昇率との関係」、電気学会論文誌 A-104, 3, p.131 (昭59)

(10) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"Reignition Voltage and Arc Voltage on Contaminated Insulator Surfaces",Jpn. J. Appl. Phys., 23, 8, p.1094(1984)

(11) A.Kaga, M.Sato & H.Akagami,"AC Reignition Voltage on Partially Contaminated Insulator Surfaces", Jpn. J. Appl. Phys., 25, 3, p.388(1986)

(12) 佐藤・加賀・赤上：「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」、電気学会論文誌 A-107, 2, p.57(昭62)

(13) 電気学会試験電圧標準特別委員会絶縁試験法小委員会編：「絶縁試験法ハンドブック」、p.287（昭51）、オーム社

(14) R.Wilkins,"Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films",Proc.IEE, 116, No.3, p.457(1969)

(15) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック（改訂新版）」、p.145（昭55）、オーム社

(16) L.L.Alston & S.Zoledziowski,"Growth of discharges on polluted insulation",Proc.IEE,Vol.110,7,p.1260(1963)

(17) 加賀・佐藤・赤上：「交流汚損沿面アークの特性（塩分付着密度依存性）」、電気学会論文誌 B-98, 5, p.425(1978)

(18) 佐藤・加賀・赤上・沢田・金子・田頭：「汚損沿面アーク放電の分光分析について」、昭和58年電気学会全国大会、No.1068

(19) 電気学会放電ハンドブック出版委員会編：「放電ハンドブック（改訂新版）」、p.12,13（昭55）、オーム社

(20) E.Nasser,"Contamination flashover of outdoor insulation," ETZ-A, Bd.93, H.6, s.321(1972)

(21) M.Sato, A.Kaga & H.Akagami,"AC Minimum Flashover Voltages and Wave Number of Occurrence of Local Discharges Prior to Flashover on Polluted Insulators", Annual Report of CEIDP, No.Ⅳ-6,,Claymont,DE,USA p.234(1984)

第６章　氷結時における汚損がいしのフラッシオーバ現象の基礎特性

６．１　まえがき

降雪寒冷地域においては、送電線路のがいしが氷結や冠雪によってしばしばフラッシオーバ事故を起こす。特に、日本海沿岸地域の送変電施設では、冬期のフラッシオーバ事故率が他期に比べて高くなっている[1][2]。冬期間には、北西の季節風が多大な海水の飛沫を陸地に送り、この塩分ががいし面に直接付着するほか、鉄塔やがいしの冠雪に含まれることになる。従って、冠雪氷に起因する事故は冠雪やつららによるがいし漏れ距離の短縮によってのみ起こるのではなく、大部分は塩分付着が介在しているものと考えられる。従って、この問題は前章までに取り扱ってきた汚損フラッシオーバ現象の一つの形態であるといえよう。

実用がいしの氷結時のフラッシオーバ現象に関する報告は、従来いくつかなされている[3][4]。しかしながら、その多くは各種がいし間の耐電圧の優劣順位に関するものである。また、対象としている氷に塩分が含まれていない場合がほとんどである。従って、氷結と汚損を同時に受けた場合のがいしのフラッシオーバに関しては不明な点が多い。これは、この問題が地域的に限定されていることが大きな原因であるが、その他にも次のようなことが原因として考えられる。

一つには自然条件の複雑さが挙げられる。ほぼ同一位置にあるがいし、例えば隣合ったがいしでさえ氷結状態が異なることがある。風向、風速、気温、湿度および日照などの気象条件が複雑に作用しているものと考えられる。次に、系統の全がいしを常に監視するのでなく、通常は事故後に、しかもかなりの時間経過後に初めてそのがいしの状況を目にすることが挙げられる。従って、事故前のがいしの氷結状態は周囲の状況や気象情報などで推測するより方法がない。主にこの二つの理由から、がいしの氷結過程ならびにフラッシオーバ過程に関する情報がほとんどないものと考えられる。

氷結時の汚損フラッシオーバ事故に関しては、冠雪時と同様に実課電状態の送電線を監視したり、実規模の屋外実験を行うことのほかに、氷結過程や融解の過程に関して基礎的な検討も必要であると思われる。本研究は、冠雪に関する研究に比べて立ち後れが目立つがいしの氷結時の汚損フラッシオーバ特性について実験的検討を行ったものである[5][6]。実験は、送電線の鉄塔アームに積もった塩分を含む雪が融解してがいし面へ滴下し、その後がいし表面で氷結した場合を模擬して行った。これは、東北電力（株）管内での代表的な氷結事故原因と考えられている[7]。

6．2　実験方法

氷は物理学的[8]にも気象学的[9]にも細かく分類されている。更に、がいし面での氷結状態も場所によって多様であり、また時間と共に変化するものであろう。しかし、ここでは実用がいしにおいて比較的頻繁に観測される次の３通りの氷結状態[10]を、主として比重の点から模擬した。ただし、文献に現れる大部分の氷と大きく異なる点は、本実験の氷が比較的多量の塩分（NaCl）を含んでいることである。

（ａ）［氷Ｇ］：表面が滑らかなガラス状の氷。がいし表面に固く付着する。比重が０．９以上で、「雨氷（Glaze）」[9]と呼ばれる氷に近い。

（ｂ）［氷Ｈ］：氷は固いが、がいしとの界面で水分が多く、がいし面との付着は弱い。比重が０．６～０．９で「粗氷（Hard rime）」[9]と呼ばれる氷に近い。

（ｃ）［氷Ｓ］：シャーベット状を呈し水分がかなり多く、表面はざらついている。がいし面との付着は弱い。比重が０．１～０．６で、「樹氷（Soft rime）」[9]と呼ばれる氷に近い。

試料となるこれら（ａ）～（ｃ）の氷結汚損帯は、－８℃に冷却した磁器製の平板がいしに汚損液をスプレーすることによって作製した。汚損液は、イオン交換水１ℓ中に所定量の食塩と４０ｇのカオリンを混合したものである。従って、食塩量を調整すると汚損液の凝固点が変わるので、汚損帯の氷結状態を変えることができる。試料の作製方法は次の通りである。

初めに、長さ１９cm、幅８cm、厚さ２cm の平板がいしを中性洗

剤て洗って表面の発水性を取り除く。これを電圧印加時の冷凍庫内の温度（－８℃）と等しくなるように７時間冷却した。次に、この平板がいしを冷凍庫から取り出し、直ちに一定量の汚損液をがいし面にスプレーする。この場合、前章までの実験と同様に懸垂がいし上面の傾きを模擬するため、平板がいしを水平面に対して３０度の角度で設置した。通常行われている常温時（非氷結時）の等価霧中試験[11]では、がいし面の漏れ抵抗が飽和するまで十分に汚損液をスプレーする。しかし、がいし面の傾斜によって時間経過と共に汚損液の付着量はスプレー量によらずほぼ一定となる。これに対して、氷結時には３０度に傾けたがいし面でも汚損液の流動は極度に小さくなるので、がいし面での塩分の保有量が大になる。このため、スプレー量によって付着量は著しく異なるものと考えられる。そこで、本実験においてはスプレーする汚損液の量を一定とし、がいし面の氷結状態から経験的にその量を５mℓとした。

汚損液をスプレーし、所要の氷結状態が得られたら、できるだけ素早く長さ１０cm、幅５cm の方形汚損帯を作製する。これを冷凍庫内に設置し、電極をセットする。電極の配置は前章までの研究と同様である。

なお、汚損液はステンレス製の容器に入れて平板がいしとともに－８℃の冷凍庫内で７時間冷却した。本実験においては、イオン交換水１ℓに対し食塩量を１０～４０ｇとしたので、食塩水としての凝固点降下は０．６～２．３℃となる[12]。従って、－８℃で７時間冷却すれば汚損液は凍結するはずであるが、実際の液温は－３～＋１℃であり凍結することはなかった。これは、温度が低いため対流現象が抑制されていることや、汚損液中に沈澱しているカオリン

（主成分：SiO_2）が汚損液の平均的な温度降下を妨げているためではないかと考えられる。

また、本研究においても電圧印加からフラッシオーバまでの局部放電の発生状況を観測するため、ストリーク・カメラを用いて流し撮りによる写真撮影を行った。

冷凍庫は容積が 345ℓであり、温度制御装置により－８℃（変動幅±２℃）に保った。この場合の庫内の相対湿度は７０％である。従来の報告によると、氷結による汚損フラッシオーバ事故は、前夜－８℃程度の最低気温を経たがいし面の氷が、朝方の気温の上昇や日射によって融解し始める過程で生じていることが多い[13]。従って、－８℃という気温は事故発生時のがいし表面の温度と一致していないものと考えられるが、従来事故時に度々報告されている最低気温である[8]。このため、ここではこの気温を実験条件として採用した。

実験装置および電圧の印加方法は前章までの研究と同様である。

６．３　氷結時の塩分付着密度

一般に、水平面に対して傾斜をもつ平板がいし面に一定量の汚損液をスプレーする場合、汚損液の粘度が変わると流下する速度が異なるので、一定時間後のがいし面の塩分付着密度は変化する。粘度は汚損成分が同一ならばその濃度と液温によって決まるので、常温時と氷結状態では同一濃度で同一量の汚損液をスプレーしても塩分付着密度が異なっているものと考えられる。前節で述べたように、本実験では温度－８℃のもとで約７時間冷却した平板がいしと汚損液を用いて氷結汚損帯を作製した。そこで、フラッシオーバ試験に先立ち、本実験条件における氷結汚損帯の塩分付着密度を測定した。

図６．１に、汚損液中の食塩量（g/ℓ）と氷結時における塩分付着密度ｗ（mg/cm^2）との関係を示した。図中には、比較のために常温時（非氷結時）における塩分付着密度ｗも示したが、この場合はｗが食塩量と共に直線的に増大している。これに対して、氷結時の塩分付着密度ｗは直線的にはならず、またその値も常温時のそれの５～９倍と著しく高い値となっている。塩分付着密度のばらつきはシャーベット状の［氷Ｓ］で最も大きくなっているが、これは厚さが不均一になりやすいためと考えられる。

前述のように、がいし表面における塩水の氷結過程やつららの発生過程については不明な点が多い。例えば、塩水が鉄塔の融雪による場合には、その塩分濃度は数10ppm～数100ppmとそれほど高くないものと考えられる[14]。また、フラッシオーバ後の塩分付着密度の測定は通常がいし全面を対象として行われるため、平均化され、局部的な高濃度部分は見逃されがちである。しかし、本研究による

と、低濃度の塩水でもその凝固点より低温になっているがいし面では氷結などによって塩分が保有され、結果的に高い塩分付着密度となり得ることが分かる。この場合、塩水中あるいはがいし面の非溶解性固形分（本実験においてはカオリン）が塩分付着密度の大小を大きく支配するようである。すなわち、塩水がその濃度での凝固点より低い温度のがいし表面を流下できるのは、この非溶解性固形分による影響が大きいものと考えられる。がいし連に発生する塩水つららの生成過程もこれとほぼ同様な過程を経るものと考えられる。

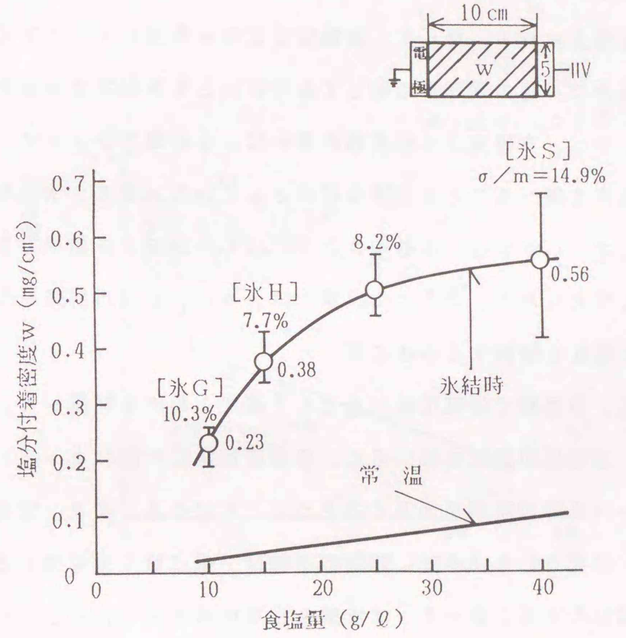


図６．１　汚損液中の食塩量と氷結時の塩分付着密度との関係

６．４　氷結状態によるフラッシオーバ特性の差異

＜６．４．１＞ フラッシオーバ電界強度と電圧上昇率

実用がいしでは、課電状態のもとでがいし面に融雪塩水が滴下したりあるいは塩分を含む雪が付着し、これが低温によって氷結するものと考えられる。従って、実験室でこれを再現しようとするならば、初めに一定の電圧を印加してからがいしを氷結させる必要がある。しかし、本研究は氷結状態の違いによる最低フラッシオーバ電圧の差異を調べることを主要な目的としている。また、氷結時のフラッシオーバは氷結する過程よりは、むしろ融解する過程で生ずるものと考えられる。そこで本実験では、初めに氷結汚損帯を作製してから電圧を印加する方法を採った。

また、本実験では電圧印加法として電圧上昇法を採用した。すなわち、定電圧印加法を用いると、その印加電圧の値によってフラッシオーバまでの時間が大きくばらつくことになる。また、定印霧中法[11]に見られるように、電圧の印加は一般に数十分程度と比較的長時間にわたる。従って、本実験を定電圧印加法で行うとフラッシオーバ時点では汚損面の氷がほぼ融解してしまい、氷結状態による差異が分からなくなる場合が多いものと考えられる。これに対して電圧上昇法では、電圧上昇率が変われば同一の印加電圧においてもフラッシオーバまでの時間が変わることになり、氷結状態の変化や局部放電の発生状況とフラッシオーバとの関連を見出しやすい。

図６．２～図６．４に、各氷結状態におけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Ｂとの関係を示した。図中の○印は１回のフラッシオーバ試験に対応する。E_fは図のように上昇率Ｂに対して

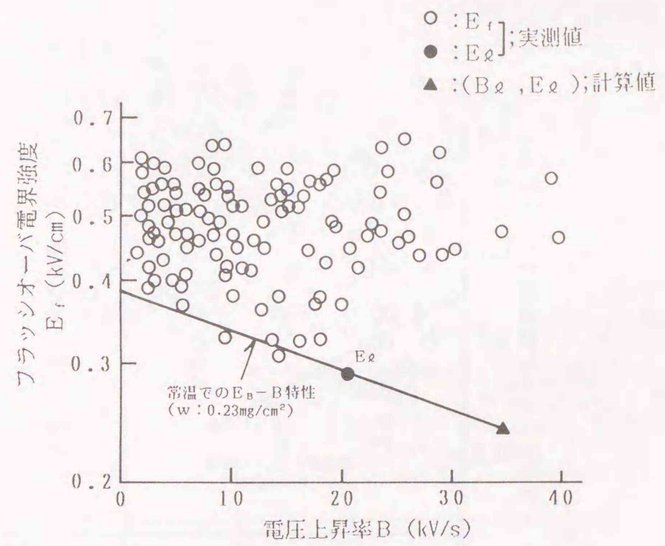


図６．２　［氷Ｇ］におけるフラッシオーバ電界強度と電圧上昇率との関係（w：0.23mg/cm²）

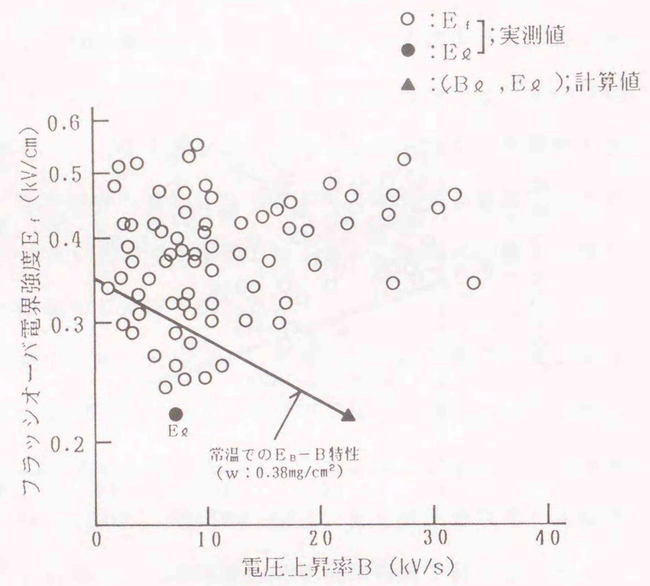


図６．３　［氷Ｈ］におけるフラッシオーバ電界強度と電圧上昇率との関係（ｗ：0.38mg/cm²）

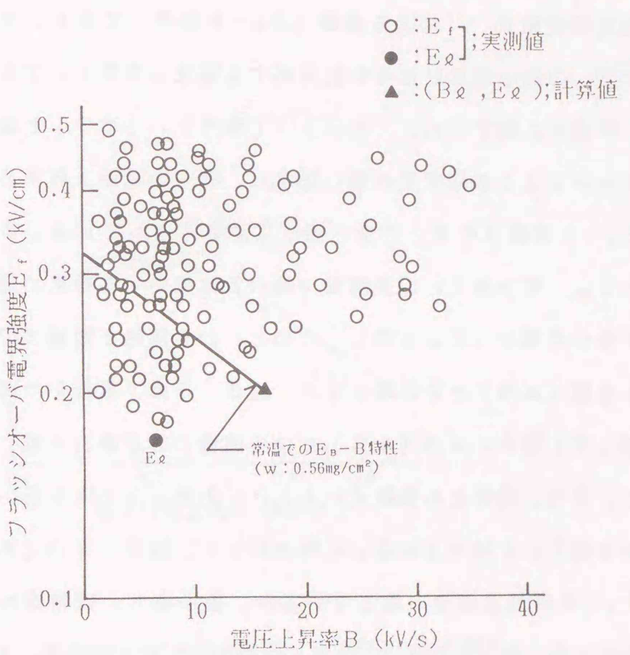


図６．４　［氷Ｓ］におけるフラッシオーバ電界強度と電圧上昇率との関係（ｗ：0.56mg/cm²）

かなりのばらつきを示す。しかし、ここでは各氷結状態でのE_fの最低値に注目して検討を行った。

図６．２～図６．４中の実線は、それぞれの塩分付着密度ｗに対して常温（３０℃）のもとで得られている最低フラッシオーバ電界強度の実験式[15]による曲線（E_B-B特性）である。また、▲印はE_fの極小値E_ℓとそれに対応する電圧上昇率B_ℓである。

各図を比較すると、［氷Ｇ］、［氷Ｈ］、［氷Ｓ］と塩分付着密度ｗが大きく氷結状態が弱い順番に、同一の電圧上昇率Ｂに対してE_B-B曲線よりE_fの低い測定点が多くなっている。本実験においては、極小値E_ℓの実測値（●印）は発生する頻度が低いためなかなか得難かった。しかし、このE_ℓの実測値と常温での実験式による値（▲印）とを比較すると、図６．３の［氷Ｈ］で両者はほぼ等しく、図６．４の［氷Ｓ］では実測値の方が著しく低くなっている。また、両者とも実験式によるB_ℓの値よりかなり低い上昇率で極小値E_ℓとなっている。これに対して、図６．２の［氷Ｇ］ではE_B-B特性とほぼ一致しているが、極小値E_ℓは常温時の値よりかなり高くなっている。これは、次のように考えられる。すなわち、氷結時のフラッシオーバは氷の融解が前提となる。このため氷の融解に要する時間が印加電圧の上昇率の中に含まれる。従って、同一上昇率ならば凍結状態の［氷Ｇ］は水分が多い［氷Ｈ］や［氷Ｓ］に比べてフラッシオーバまでの所要時間が長くなる。電圧上昇法では時間の経過は電圧の上昇を意味するため、このような場合には結果的にフラッシオーバ電圧が高くなる。

図６．５に、各氷結状態での極小値E_ℓの実測値と塩分付着密度Ｗとの関係を実線で示した。また、図中の破線は、E_ℓの実測値と

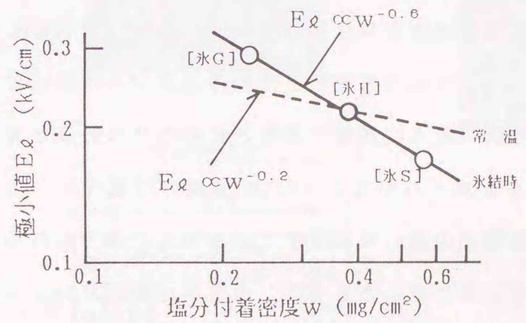


図６．５　極小値E_ℓの実測値と塩分付着密度ｗとの関係

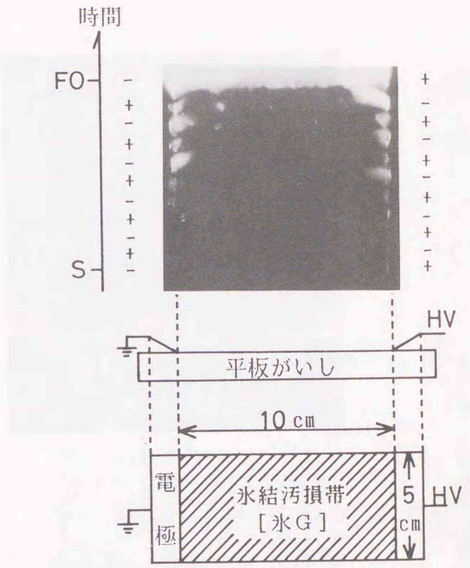
計算値がほぼ等しい［氷H］を基準にした常温時の$E_\rho \propto w^{-0.6}$の関係を表している。図から、氷結時には極小値E_ρは塩分付着密度wの－０．６乗に比例する結果となり、常温時に比べて塩分付着密度依存性が大きく現れている。

＜６．４．２＞ 局部放電の発生状況

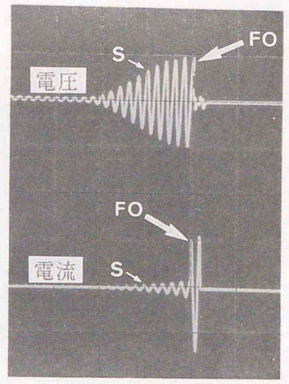
前章までに述べたように、交流課電時の汚損フラッシオーバは局部放電が半波毎に発生と消滅あるいは伸展を繰り返して生ずる[16]。すなわち、局部放電の役割はそれ自体が電離による電子の供給を行うことのほかに、主としてその放電根近傍の汚損面から汚損成分中のＮａ原子を放電空間へ新たに蒸発・飛散させることにあると考えられる。汚損フラッシオーバが２００V/cm 程度の低電界[17]で生ずるのは、この電離電圧の低いＮａ原子によるものと考えられる。

一方、前節の図６．５に示したように、塩水氷結時においてもフラッシオーバ電圧は氷結汚損帯の塩分付着密度に依存していることが分かった。従って、氷結時においてもフラッシオーバ前までの局部放電の発生状況を把握しておく必要があろう。

図６．６～図６．８に、各氷結状態での代表的な（ａ）局部放電の流し写真と、（ｂ）そのときの電圧、電流オシログラムを示す。各図（ａ）を見ると、いずれの氷結状態においても局部放電が始発するとそれがフラッシオーバまで半波毎に連続的に発生していることが分かる。これは氷結時の特徴である。すなわち、常温時（非氷結時）においては、特に電圧上昇率が小さい場合などには放電根近傍の汚損面の乾燥が早く、局部放電の発生は間欠的になりがちである。これに対して、氷結時においては常温時に比べて汚損面の水分



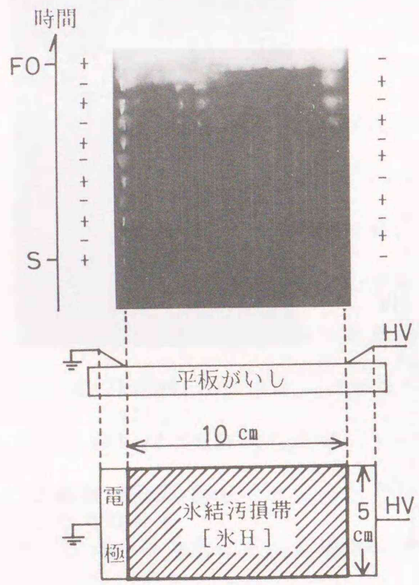
（ａ）流し写真



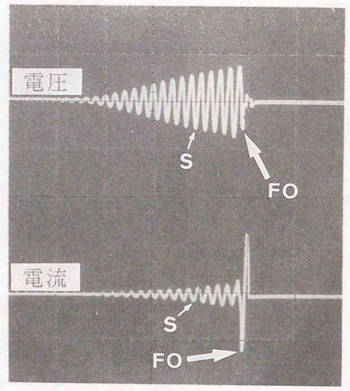
v:10kV/div
i:5A/div
t:0.1s/div

（ｂ）電圧、電流のオシログラム

図６．６　［氷Ｇ］における局部放電の流し写真と電圧、電流のオシログラムの例（w:0.23mg/cm²）



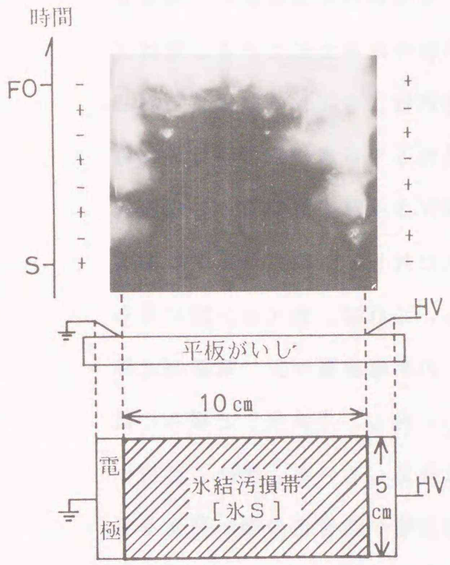
（ａ）流し写真



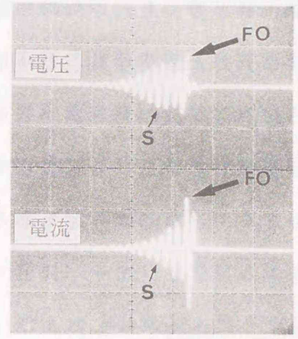
v:10kV/div
i:5A/div
t:0.1s/div

（ｂ）電圧、電流の
オシログラム

図６．７　［氷Ｈ］における局部放電の流し写真と
電圧、電流のオシログラムの例（w:0.38mg/cm²）



（ａ）流し写真



v:10kV/div
i:5A/div
t:0.1s/div

（ｂ）電圧、電流の
オシログラム

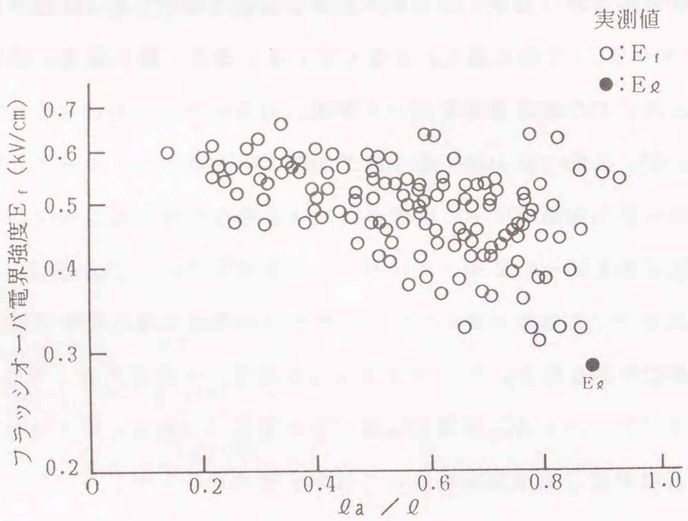
図６．８　［氷Ｓ］における局部放電の流し写真と
電圧、電流のオシログラムの例（w:0.56mg/cm²）

が多い。この水分が、その印加電圧のもとでは局部放電が発生し得ないような過大な乾燥帯の広がりを抑制しているものと考えられる。このため、氷結汚損帯において放電が連続的に発生しやすいものと考えられる。

このように、いずれの氷結汚損帯でも局部放電は連続的に発生しやすいものの、それぞれの局部放電の特性は異なっている。特に、［氷Ｇ］および［氷Ｈ］と［氷Ｓ］とでは、各（ｂ）図に見られるように放電電流の大きさが明らかに異なっている。前二者は印加電圧が上昇しているにも関わらずフラッシオーバ半波前までの電流値は小さく、またほぼ一定である。これに対して、後者は徐々に増大しながらフラッシオーバに至っている。これは、各（ａ）図に見られるように、［氷Ｇ］および［氷Ｈ］の局部放電が主に電極端近傍で発生しその後ほとんど伸展しないのに対し、［氷Ｓ］の場合には半波毎に電極間を伸展していくことに対応している。更に、目視によると［氷Ｇ］および［氷Ｈ］の局部放電が淡青色の弱い発光を呈するのに対し、［氷Ｓ］は常温時の汚損沿面アークのようにＮａ原子の炎色反応を示す。これらの特性は、いずれも汚損面上の氷の融解に起因している。すなわち、［氷Ｇ］や［氷Ｈ］のように汚損面の大部分が氷結している場合には、これを融解するためかなりの電力消費が必要であるから［氷Ｓ］の状態になるまでには時間がかかる。電圧上昇法においては時間の経過は印加電圧の上昇を意味するから、結果的にフラッシオーバ電圧は高くなる。

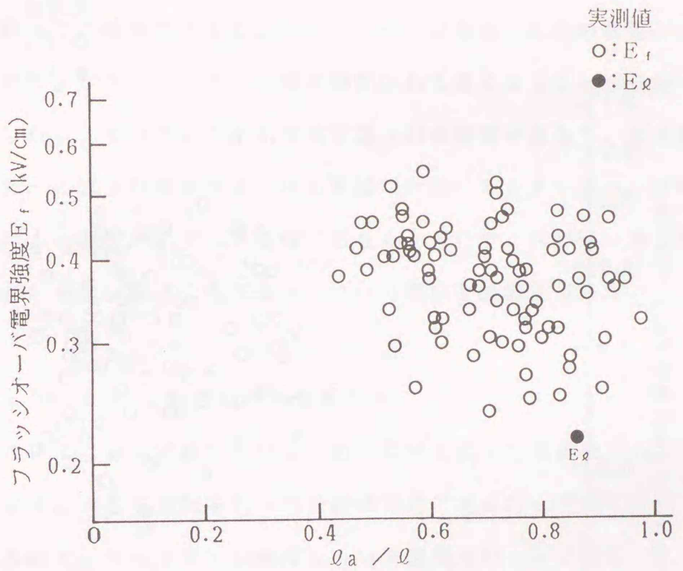
以上のように、本実験の［氷Ｇ］および［氷Ｈ］では汚損面からのＮａ原子の十分な蒸発・飛散が行われずにフラッシオーバに至っているものと考えられる。そこで、フラッシオーバ半波前の局部放

電の長さℓ_aと電極間距離ℓとの比とフラッシオーバ電界強度E_fとの関係をみると、図６．９～図６．１１のようになる。いずれの氷結状態においてもℓ_a / ℓが大きくなるに伴ってE_fは低下し、０．８～０．９で極小値E_ℓとなっている。また、極小値E_ℓが生ずるℓ_a / ℓの値は［氷Ｇ］⇒［氷Ｈ］⇒［氷Ｓ］の順で小さくなっている。また、第４章で述べたように、電極間の２０％が非汚損部であっても全面が均一に汚損されている場合と極小値E_ℓは変わらないことが明らかとなっている[18]。本実験において、ℓ_a / ℓ＝０．８～０．９で極小値E_ℓが得られているのはこれと同様な現象であると考えられる。



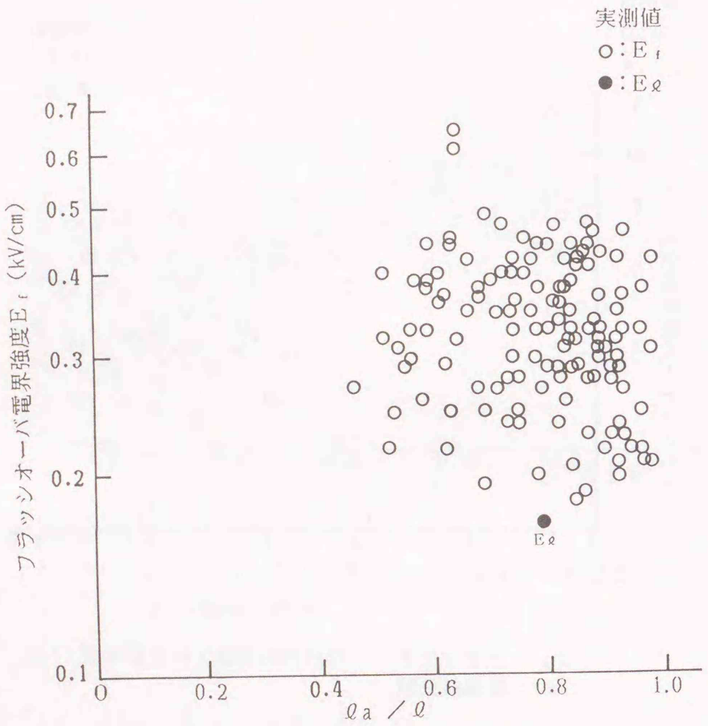
ℓa ：フラッシオーバ半波前の局部アーク放電長
ℓ ：電極間距離

図６．９　［氷Ｇ］におけるフラッシオーバ電界強度と
比 ℓa ／ ℓとの関係（ｗ：0.23mg/cm²）



ℓa ：フラッシオーバ半波前の局部アーク放電長
ℓ ：電極間距離

図６．１０　［氷Ｈ］におけるフラッシオーバ電界強度と
比 ℓa ／ ℓとの関係（ｗ：0.38mg/cm²）



ℓ_a ：フラッシオーバ半波前の局部放電長
ℓ ：電極間距離

図６．１１　［氷Ｓ］におけるフラッシオーバ電界強度と
比 ℓ_a / ℓ との関係（ｗ：0.56mg/cm²）

６．５　同一塩分付着密度で氷結状態が異なる場合の
フラッシオーバ特性

前節までの結果によると、シャーベット状を呈し氷結の状態が弱い［氷Ｓ］でフラッシオーバ電界強度が最も低くなることが分かった。しかし、それぞれの氷結状態で塩分付着密度が異なり、また極小値 E_ℓ の塩分付着密度依存性も常温時に比べて大きいため、氷結状態による差異が必ずしも明確ではない。そこで、次に同一塩分付着密度で氷結状態を変えた場合について同様な検討を行った。

＜６．５．１＞ 氷結汚損帯の作製方法

表６．１に、本実験における氷結汚損帯と塩分付着密度ｗとの関係を示す。前節で実験を行った条件は○印で示した。本章においては、表中（ⅰ）～（ⅲ）の条件について実験を行った。次に、これら３種の氷結汚損帯の作製手順の概略を述べる。

（ⅰ）［氷Ｓ］、ｗ：０．２３mg/cm²

初めに、＜６．２＞節で述べた手順により［氷Ｇ］の氷結状態を作製する。これを３分間外気に曝す。シャーベット状の［氷Ｓ］となったら、直ちに１０cm×５cm の方形汚損帯を作製する。

（ⅱ）［氷Ｓ］、ｗ：０．３８mg/cm²

初めに、＜６．２＞節で述べた手順により［氷Ｈ］の氷結状態を作製する。これを１分間外気に曝す。［氷Ｓ］となったら、直ちに１０cm×５cm の方形汚損帯を作製する。

（ⅲ）［氷Ｇ］、ｗ：０．３８mg/cm²

表６．１　実験条件

塩分付着密度 w（mg/cm²）	氷 G	氷 H	氷 S
０．２３	○		（ｉ）
０．３８	（ⅲ）	○	（ⅱ）
０．５６			○

○：前節（６．４）での実験条件
（ｉ）～（ⅲ）：本節（６．５）での実験条件

冷凍庫内温度：－８℃
外気温：＋８～＋１２℃

初めに、＜６．２＞節で述べた手順により［氷Ｈ］の氷結状態を作製する。これを冷凍庫内に入れて５分間冷却する。［氷Ｇ］が得られたら直ちに１０cm×５cm の方形汚損帯を作製する。その後、再び冷凍庫内にて５分間冷却する。これは方形汚損帯を作製する際に多少［氷Ｇ］の氷結状態が緩むためである。

なお、これらの作業はすべて外気温が８～１２℃、庫内温度－８℃のもとで行った。

＜６．５．２＞ フラッシオーバ電界強度の極小値E_ℓ

図６．１２～図６．１４に実験結果として、それぞれ前述の（ｉ）～（ⅲ）の氷結状態におけるフラッシオーバ電界強度E_fと電圧上昇率Ｂとの関係を示す。

塩分付着密度ｗが０．２３mg/cm² の［氷Ｓ］である図６．１２では、常温時のE_B－Ｂ特性より低い値が現れている。また、極小値E_ℓ（●印）も常温時のそれ（▲印）より低くなっている。更に、同一のｗである［氷Ｇ］のE_ℓ（■印）より著しく低くなり、その発生上昇率B_ℓも小さくなっていることが分かる。

図６．１３はｗが０．３８mg/cm² の［氷Ｓ］であるが、この場合もE_fは全般に常温時のE_B－Ｂ特性より低くなっている。また、E_ℓは常温時の計算値（▲印）および図６．３の［氷Ｈ］における実測のE_ℓ（■印）に比べてかなり低くなっている。

これに対して、図６．１４のｗが０．３８mg/cm² の［氷Ｇ］では、［氷Ｈ］の値（■印）よりE_ℓが高くなっている。

以上の実験結果から、極小値E_ℓの実測値に注目し、これをｗに

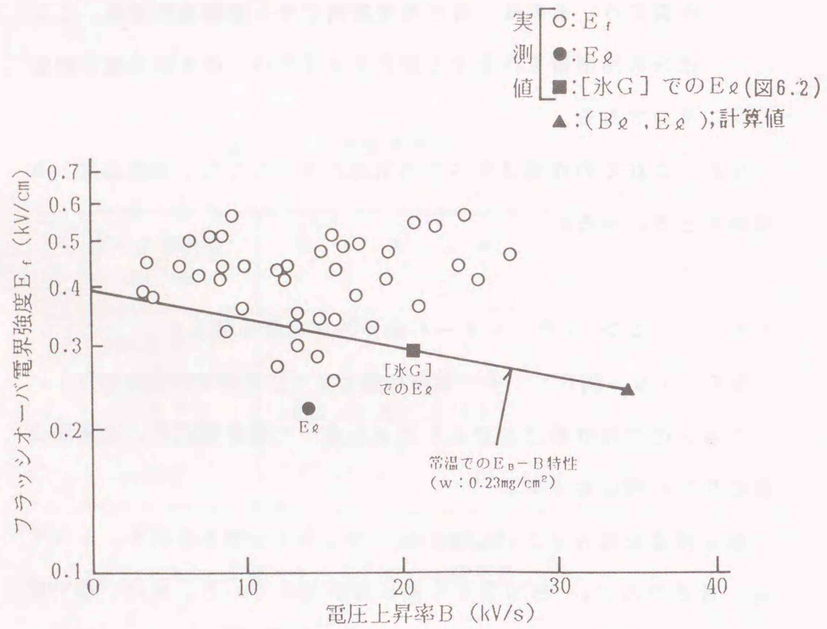


図６．１２　［氷Ｓ］におけるE_f-B特性（w：0.23mg/cm²）

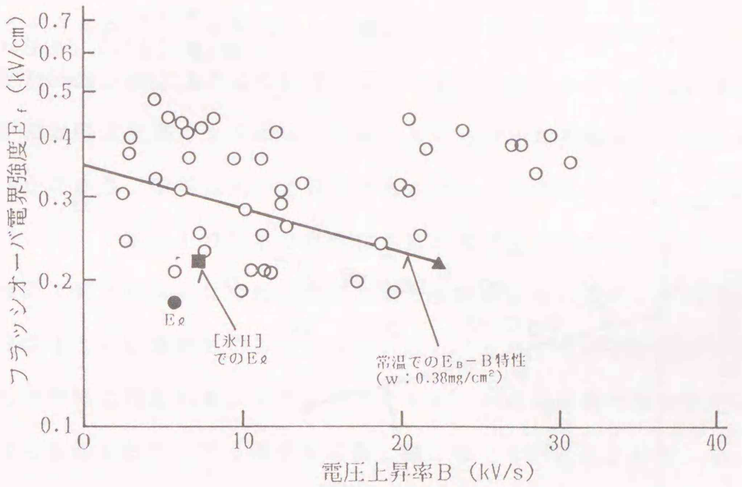


図６．１３　［氷Ｓ］におけるE_f-B特性（w：0.38mg/cm²）

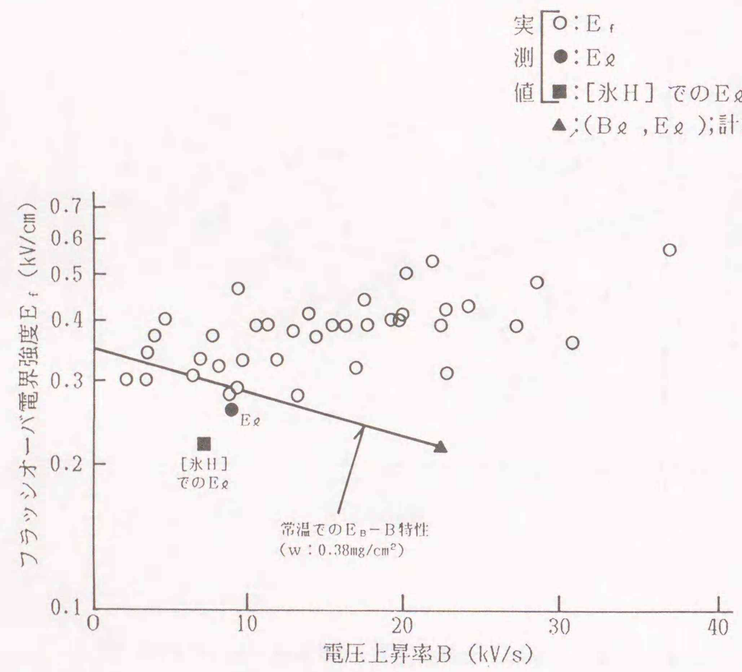


図６．１４　［氷Ｇ］におけるE_f－Ｂ特性（ｗ：0.38mg/cm²）

関して整理すると図６．１５のようになる。図中の破線は常温時の$E_\ell \propto w^{-0.2}$の関係を示しており、＜６．４．１＞項で述べたようにｗが０．３８mg/cm² の［氷Ｈ］はこの特性と一致している。図から［氷Ｓ］においても極小値E_ℓは$w^{-0.2}$に比例していることが分かる。また、［氷Ｇ］についても同様であるとみなすことができる。常温時を基準とすると、極小値E_ℓは凍結状態の［氷Ｇ］では２０％高く、シャーベット状態の［氷Ｓ］では２０％低くなることが分かった。このように［氷Ｇ］で極小フラッシオーバ電界強度が常温時より高くなるのは、氷結している汚損面を融解するのに時間がかかり、印加電圧が上昇するためであると考えられる。これに対して、［氷Ｓ］では氷の融解にさほど時間を要しない。また、常温時（非氷結時）には局部放電によって汚損面から飛散した汚損成分はほとんど補給されることはないが、［氷Ｓ］ではこの塩分の補給が容易に行われる。また、フラッシオーバ時の放電空間は低温に抑えられており、Ｎａ原子が拡散し難くなっていることも考えられる[19]。これらの要因が［氷Ｓ］のフラッシオーバ電圧を低下させているものと考えられる。

一般に、汚損がいしのほぼ全面に微量の冠雪がある場合にフラッシオーバ電圧が著しく低下することが分かっている[20]。これは融雪がフラッシオーバの前提となるが、大量の冠雪はその融雪時にがいし面から塩分を脱落させるのに対し、微量冠雪の場合には脱塩作用も少なくフラッシオーバ時点の塩水補給が行われやすいためである。本実験条件における［氷Ｓ］はシャーベット状を呈し、この点で微量冠雪の状況と著しく類似している。すなわち、実用がいしにおいてもシャーベット状の氷結時あるいは微量冠雪がある場合には、

これらが日の出などにより日射を受けて融解するような条件下で容易にフラッシオーバし得ることが推測される。

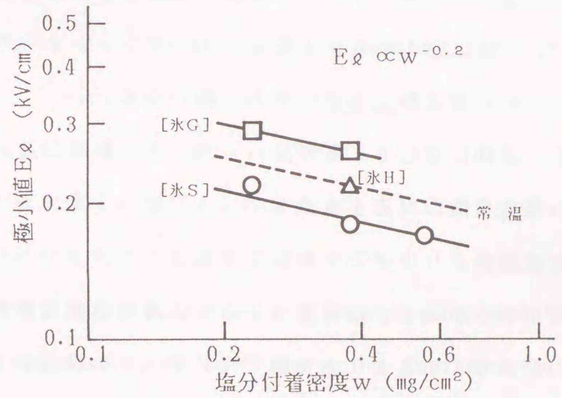


図６．１５　各氷結状態でのＥℓ－ｗ特性

6．6　まとめ

本章においては、がいし面で塩水が氷結する場合を模擬してそのフラッシオーバ特性について実験的な検討を行った。主要な結果をまとめると、次のようになる。

（１）低濃度の塩水でも、氷結時にはがいし面の塩分付着密度が著しく高くなり得る。

（２）塩分付着密度が同一ならば、［氷Ｇ］と称したガラス状の氷ががいし面に固く付着する場合には、フラッシオーバ電界強度の極小値E_ℓが常温時よりほぼ２０％高くなる。

（３）これに対して、実用がいしでは水の融解が進み水分がかなり多い氷結状態に対応するシャーベット状の［氷Ｓ］では、極小値E_ℓは常温時よりほぼ２０％低下する。

実用がいしが被る氷結状態はその生成過程や気象条件により多様なものがあり、もとより本実験条件ですべてを説明することはできない。しかし、今後実用がいしの氷結時や塩水つらら発生時のフラッシオーバ特性を検討する上で重要な手掛かりとなる結果が得られた。

参考文献

（１）　東北電力（株）総合研究所：研究報告,No.76020(1977)

（２）　五十嵐・石垣・田口・佐藤・加藤：「降雪期におけるがいしの汚損耐電圧特性」、東北電力期報、No.42, p.80(昭54)

（３）　M.M.Khalifa & R.M.Morris,"Performance of Line Insulators Under Rime Ice", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-86, p.692(1967)

（４）　M.D.Charneski, G.L.Gaibrois & B.F.Whitney,"Flashover Tests of Artificially Iced Insulators", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-101, p.2429(1967)

（５）　佐藤・赤上・斉藤・橋本・佐藤(安)・小川・松田：「塩水の氷結状態によるがいしの交流フラッシオーバ特性」、昭和63年度電気学会全国大会、No.1020

（６）　M.Sato, H.Saito, A.Kaga & H.Akagami:"Fundamental Characteristics of AC Flashover on Contaminated Insulators Covered with Ice", Jpn. J. Appl. Phys., 28,5,p.889(1989)

（７）　船山竜之助：私信（赤上陽出男氏へ、1986）

（８）　例えば、N.H.ﾌﾚｯﾁｬｰ(前野 訳)：「氷の化学物理」(1974)（共立出版）

（９）　正野重方：「気象学総論」(昭48)地人書館

（10）　例えば、L.Y.Lee, C.L.Nellis & J.E.Brown,"60Hz Tests on Ice Coated 500kV Insulator Strings",Paper A75 499-4, IEEE PES Summer Meeting, San Francisco (1975)

（11）　電気学会試験電圧標準特別委員会絶縁試験法小委員会編：

「絶縁試験法ハンドブック」、p.287（昭51）、オーム社

(12) International Critical Tables of Numerical Data, Physics, Chemistry and Technology, Ⅳ, p.258(1928) McGRAW HILL

(13) 東北電力(株)電力技術研究所：研究報告,No.88016(1989)

(14) 五十嵐・石垣・田口・佐藤・加藤：「降雪期におけるがいしの汚損耐電圧特性」、東北電力期報、No.42, p.80(昭54)

(15) 佐藤・加賀・赤上：「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」、電気学会論文誌 A-104, 3, p.131（昭59）

(16) B.F.Hampton,"Flashover mechanism of polluted insulation", Proc.IEE, 111, 5, p.985(1964)

(17) E.Nasser,"Contamination flashover of outdoor insulation," ETZ-A, Bd.93, H.6, s.321(1972)

(18) 佐藤・加賀・赤上：「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」、電気学会論文誌 A-107, 2, p.57(昭62)

(19) 加賀・佐藤・赤上：「汚損がいしのフラッシオーバ電圧の気温依存性」、電気学会論文誌 B-98, 5, p.433(昭53)

(20) 赤上・加賀・佐藤・坂本：「汚損がいしの着雪によるフラッシオーバ」、電気学会論文誌 B-98, 6, p.551(昭53)

(21) 前野：「北大選書 氷の科学」、p.128(1984)北海道大学図書刊行会

第７章　結論

電力系統のＵＨＶ化に際しては系統に発生する過電圧の抑制や充電電流増加に起因する諸現象への対策問題と共に、がいしの絶縁特性の向上が重要な検討課題となっている。汚損がいしに関する従来の研究は実規模での絶縁耐力試験が主体であったため、汚損フラッシオーバ現象の基礎的事項に関する研究の必要性が再認識されつつある。すなわち、汚損フラッシオーバ事故は、従来の人工汚損試験では無視されがちな異常に低いフラッシオーバ電圧が生ずるような厳しい条件下で起こるものと考えられる。従って、この点の解明なくしては汚損フラッシオーバ事故の根絶は成し得ないであろう。もとより、過絶縁は絶縁協調上も経済的にも避けるべきである。しかし、複雑多岐にわたる自然条件下で使用されているがいし類の汚損フラッシオーバ現象に関する基本的な特性を一つでも多く明らかにすることは、送変電設備の保守・管理はもとより、耐汚損性能の優れたがいしを開発・設計するための基礎ともなり、工学的に意義のあることである。

本研究は、以上のような背景のもとに、主としてがいしの汚損フラッシオーバ電圧を低下させる因子についていくつかの実験的検討を行った。以下に、本研究で得られた主要な結果を述べ、引き続きそれらの工学的意義ならびに今後に残された問題点について述べる。

７．１　本研究の主要な結果

第１章は緒論であって、本研究を行った背景、従来の研究の概要ならびに本研究の目的と内容について述べている。とりわけ、従来

の研究の概要では、本研究における考察の基礎をなし、著者もその一員として研究を行った「汚損沿面アークの特性」について概説している。

第２章では、「汚損がいし面上における交流再点弧特性」について述べている。これは、交流汚損沿面アーク放電に関する実験において、半波毎に繰り返す再点弧時の電圧特性について検討したものである。実験は、平板がいし面上の乾燥した方形汚損帯に一定電圧を印加してこれを加湿し、フラッシオーバ後のアークコラムが汚損面から浮上しない範囲で少なくとも２０半波（２００ms）程度再点弧を繰り返させた。汚損帯はその全面が汚損されている場合（全面汚損）、汚損部分と非汚損部分が混在する場合（部分汚損）の二通りであるが、これらとの比較のため全く汚損しない場合（全面非汚損）についても実験を行った。その結果、汚損フラッシオーバに関して次のような知見が得られた。

（１）全面汚損および部分汚損の場合の再点弧電圧V_rとアーク電圧V_aは再点弧数Ｎの増大に伴って徐々に低下し、最低値を経て上昇に転ずるＶ字形の特性を示す。しかし、全面非汚損の場合にはある波数で上昇をやめてほぼ一定値となる。

（２）全面汚損および部分汚損の場合には、塩分付着密度ｗが大きくなるに伴って再点弧電圧V_rの最低値V_Rが生ずる再点弧数は大になっている。

（３）全面汚損および部分汚損の場合には、再点弧電圧V_rの最低値V_Rとアーク電圧V_aの最低値V_Aはともにアーク電流i_aの－１乗に比例する。ただし、この関係が成り立つi_aの範囲はV_Rに関しては０.６A 以下であり、V_Aでは０.３５A 以下である。すなわち、これらの範囲内では最低値V_Rとアーク電流i_aとの積の

平均値$<V_R i_a>$および最低値V_Aとi_aとの積の平均値$<V_A i_a>$はそれぞ

（４）全面汚損および[illegible]圧V_rの最低値V_Rは塩分付着密度ｗの－１／５乗に比例している。この特性は汚損がいしにおけるフラッシオーバ電圧の塩分付着密度依存性と一致している。

（５）部分汚損時のV_Rとi_aの積の平均値$<V_R i_a>$は、電極間の両端の汚損の有無に大きく依存する。すなわち、両端非汚損時の$<V_R i_a>$値は全面汚損時に比べてかなり高い。これに対して両端汚損時には全面汚損時と同等か、むしろかなり低い場合がある。これは、アーク電圧に関して得られた従来の特性と類似している。

（６）全面汚損時、および汚損部の長さが電極間距離の約６０％の場合の部分汚損時の最低値V_Rを、次のような実験式で表すことができた。

$$V_R = 70\ell(wk^{1/3})^{-1/5} i_a^{-1} \quad (V) \quad \cdots\cdots\cdots (7.1)$$

以上の実験結果から、汚損フラッシオーバ現象である汚損がいし面上の交流再点弧特性は、汚損沿面アークの特性と密接な関係をもっていることが分かった。

第３章では、「方形汚損帯の交流フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係」について述べている。わが国の代表的ながいしの人工汚損試験法である「等価霧中法」は、最低フラッシオーバ電圧が得やすいので一般に採用されている。本章は、従来この試験法においてほとんど検討されていなかったフラッシオーバ電圧に及ぼす電圧上昇率の影響について実験的に検討したものである。実験は実際に用いられているがいし（以下、実用がいしと呼ぶ）のモデルとして

平板がいし上に作製した方形汚損帯を用いて行った。その主な結果は次の通りである。

（１）最低フラッシオーバ電圧V_Bあるいは最低フラッシオーバ電界強度E_Bは印加電圧の上昇率Ｂの増大に伴って低下し、極小値V_ℓを経て上昇に転ずる結果を得た。

（２）V_Bの極小値V_ℓは汚損長ℓと共に直線的に増大する。また、$\ell=0$における値は８４０Ｖと推測され、これを電極降下電圧V_Eとみなした。

（３）極小値V_ℓに対応するフラッシオーバ電界強度E_ℓは、塩分付着密度ｗについて次式のように表される。

$$E_\ell = 0.18 w^{-1/5} \quad (kV/cm) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7.2)$$

この関係を用いて、V_ℓを次式のように表した。

$$V_\ell = 0.18 w^{-1/5} \ell + V_E \quad (kV) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (7.3)$$

（４）極小値V_ℓに対応する上昇率B_ℓの実験式として次式が得られた。

$$B_\ell = 2.2 w^{-0.85} b^{-0.5} \ell \quad (kV/s) \quad \cdots\cdots\cdots (7.4)$$

（５）フラッシオーバ前までの局部アーク放電の発生波数Ｎは、上昇率Ｂにほぼ逆比例する結果が得られた。

（６）E_B-B特性においてＢ＝０に対応する最低フラッシオーバ電界強度E_0は、わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである「定印霧中法」による最低値にかなり近い値であることが分かった。定印霧中法での最低電圧の測定にはかなりの困難を伴うが、本方式により簡単にその値を推測することができる。

（７）フラッシオーバ電圧を大きく支配すると考えられるフラッシオーバ半波前の電流I_Pは、０．１～２Ａの範囲に広く分布する。また、フラッシオーバ電界強度E_fはI_Pのほぼ－０．４乗に比例

し、イギリスで開発された人工汚損試験法である「塩霧法」におけるフラッシオーバ電界強度の臨界値E_cとフラッシオーバ臨界電流I_cとの関係 $E_c \propto I_c^{-0.5}$ に近い特性が得られた。

以上の実験結果から、わが国の代表的ながいしの人工汚損試験法の一つである等価霧中法による最低フラッシオーバ電圧は、印加電圧の上昇率に依存することを明らかにした。特に、極小フラッシオーバ電圧値V_ℓは局部アーク放電がフラッシオーバまで連続して発生する場合に生ずることが分かった。また、極小値V_ℓの存在を、第２章で得られた再点弧特性を基に、フラッシオーバ時の放電空間におけるＮａ原子の挙動の面から考察した。

さて、これまで述べてきた第３章では、電極間の全面が平等に汚損された方形状のモデル汚損帯についての検討である。しかし、がいし類は一般に不平等に汚損されている。そこで、第４章と第５章では電極間が不平等に汚損されて電流密度が各部で異なるモデル汚損帯を用いて実験的検討を行った。

初めに、第４章では「不平等に汚損されたがいしモデルの交流フラッシオーバ特性」について述べている。ここでは、がいし面上の電極間に非汚損部を設けた場合のフラッシオーバ現象について検討を行っている。なお、実験は汚損部間に同一の汚損液でできるだけ細い電流通路を設けている。その結果をまとめると、

（１）非汚損部の長さℓ_0が電極間距離ℓの２０％までは、非汚損部が電極間のどこにあっても、最低フラッシオーバ電界強度E_Bは電圧上昇率Ｂに対して全面汚損の場合と同様な特性を示す。

（２）ℓ_0が０．２ℓを越えると、極小フラッシオーバ電界強度E_ℓおよびそれを生ずる上昇率B_ℓはℓ_0の増大に伴って大になる。これは、非汚損部の存在により局部アーク放電の通路上の実効的な

塩分付着密度が減少するためと考えられる。そこで、塩分付着密度wを実効塩分付着密度$w_e = w \times (\ell - \ell_0) / (0.8\ell)$ として、全面汚損時の実験式からB_ℓ、E_ℓおよびE_0を計算すると、これらの値はいずれも実測値とほぼ一致する。

（３）第（１）、（２）項の結果、およびフラッシオーバ移行時の流し写真による観測所見から、全面汚損の場合においても長さ約０.２ℓの部分の塩分はフラッシオーバへ移行する際の放電空間の状態にはあまり寄与していないものとみなすことができる。

（４）汚損幅bが小さくなるに伴って、同一の上昇率Bに対してE_Bが高くなり、また極小値V_ℓに対応する上昇率B_ℓが$b^{-0.5}$に比例して大きくなる傾向が現われている。

（５）フラッシオーバ時の高電圧側電極の極性は、非汚損部が電極間の中央にある場合には正極性、負極性ともほぼ５０％である。これに対して中央から偏在している場合には、非汚損部に近い側の電極が正極性となる半波でのフラッシオーバの発生率が高くなる。しかし、フラッシオーバ電圧には極性による差は認められなかった。

以上の実験結果から、がいし全体での平均的な塩分付着密度は小さくても、局部的に高い付着密度部分があって、これらが細い電流通路で連結された場合にはフラッシオーバ電圧が著しく低下し得ることが分かった。

次に、第５章では「実用がいし類を模擬した台形汚損帯における交流フラッシオーバ特性」について述べている。本章におけるモデル汚損帯は台形状である。台形汚損帯は狭幅部の電流密度が高いので、この部分の汚損層の乾燥が早くなり放電が発生しやすくなる。ところで、実用がいしにおいても狭幅部が存在し、従って台形汚損帯における実験結果は実用がいしの結果と強い類似性をもつものと

考えられる。本章では台形汚損帯のこのような特徴を基に、同一汚損長の円板形がいし連と長幹がいしとの比較のためモデル実験を行った。台形汚損帯を数個連結し、その連結部に金属板を置いて円板形がいし連モデルとした。これに対して、金属板を置かない場合を長幹がいしモデルとした。その結果、次のようなことが明らかとなった。

（１）方形モデルと同様に最低フラッシオーバ電界強度E_Bは電圧上昇率Bに対して依存性を示す。すなわち、E_BはBの増大に伴って低下し、ある上昇率B_ℓにおいて最も低い値E_ℓとなる。B_ℓより更に上昇率Bが大になると、最低値E_Bは高くなる傾向を示す。

（２）台形ユニットの連結数が同一の場合、すなわち漏れ距離が等しい場合には、円板形がいし連モデルの方が長幹がいしモデルより同一上昇率Bに対してE_Bが低く現われやすい。

（３）流し写真によると、台形ユニットの連結部に金属板を置くと（円板形がいし連モデル）、この部分の放電の発生電圧が金属板がない場合（長幹がいしモデル）に比べて低く、かつその放電がフラッシオーバまでの各半波で連続的に発生しやすい。

（４）フラッシオーバ電界強度は極小値E_ℓとなるためには、局部アーク放電がN_ℓ波連続して発生する必要があることがわかった。

（５）円板形がいし連モデルは台形ユニットの連結部にある金属板によって放電が連続的に発生しやすいので、長幹がいしモデルよりフラッシオーバ電圧が低下することを明らかにした。これによって、従来明確にされていなかった同一漏れ距離の円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低い原因を、放電特性から説明することができた。

（６）流し写真を基に汚損抵抗に関する形状係数を求め、これに

基づいてフラッシオーバ電圧が極小となる上昇率B_ℓについて次の実験式を導いた。

$$B_\ell = 2.2w^{-0.85}\left(\frac{2n}{a-b}\ln\frac{3a+b}{a+3b}\right)^{0.5}\ell \quad (kV/s) \qquad \cdots\cdots\cdots(7.5)$$

このB_ℓの実験式も含めたE_B-B特性の実験式は、実測の最低フラッシオーバ電界強度とよく一致している。また、極小値E_ℓとなる局部アーク放電の連続発生波数N_ℓを計算した結果、実測値に近い値が得られた。

さて、北海道や東北などの降雪寒冷地域においては、冬季に送電線路のがいしが氷結や冠雪によってしばしばフラッシオーバ事故を起こすことがある。そしてこれらの事故は単に冠雪やつららによるがいし漏れ距離の短縮のみによるものではなく、ほとんどの場合塩分汚損が介在している。しかし、事故時の状態に関する情報収集の難しさや、なによりもこの問題が地域的に限定されていることから冠雪氷が介在する場合の汚損フラッシオーバ現象に関しては不明な点が多い。そこで第6章では、冬期のがいしフラッシオーバ事故の原因の一つとされている塩水による氷結を対象とし、「氷結時における汚損がいしのフラッシオーバ現象の基礎特性」について実験的な検討を行った。実験は冷凍庫内で3種類の汚損氷結状態を作製し、電圧上昇法によってそれぞれのフラッシオーバ特性の違いについて調べた。その結果をまとめると、次のようになる。

（1）低濃度の塩水でも、氷結時にはがいし面の塩分付着密度が著しく高くなり得る。

（2）塩分付着密度が同一ならば、フラッシオーバ電圧の極小値

E_ℓは、［氷G］と称したガラス状の氷ががいし面に固く付着する場合には、常温時よりほぼ20％高くなる。

（3）これに対して、氷の融解が進み水分がかなり多い状態に対応するシャーベット状を呈する［氷S］では、E_ℓは常温時よりほぼ20％低下する。

以上の実験結果から、日本海沿岸地域における冬期のフラッシオーバ事故の主因と考えられている鉄塔からの融雪塩水が氷結した場合のフラッシオーバ電圧の低下条件と、その大略の低下率が明らかになった。

7．2　本研究の工学的意義

四方を海に囲まれているわが国においては、送電線に使用されるがいし類の汚損耐電圧の向上は重要な課題である。この課題を解決するためには、実用がいしの耐電圧試験だけではなく、がいしの汚損フラッシオーバ現象に関して基礎的な研究を積み重ねる必要がある。

以下に、本論文の工学的意義について述べる。

（1）交流課電時の汚損フラッシオーバ電圧の検討には、フラッシオーバへ移行する半波の局部アーク放電の特性が重要な意味をもっている。しかし、従来の研究では局部アーク放電の特性を直接取り扱わずに、水蒸気中や空気中のアーク特性で代用する手法が大半であった。このため、著者は汚損沿面アーク特性について種々の検討を行ってきた。本論文では更に、汚損フラッシオーバに対してより直接的な関係をもつと思われる再点弧の特性について検討した。その結果、再点弧の特性は汚損沿面アークの特性と密接な関連をもつ

ことが分かった。従って、汚損フラッシオーバ現象に関しても、局部アーク放電によって汚損面から空間に蒸発・飛散する電離電圧の低いＮａ原子の挙動に注目すべきであることを示した。

（２）わが国の代表的な人工汚損試験法の一つである「等価霧中法」は、フラッシオーバ電圧の最低値が得られやすいため各所で用いられている。この試験法は、電圧の印加方法として電圧上昇法を採用している。電圧の上昇率がフラッシオーバ電圧に影響を及ぼすと考えられながら、従来ほとんど検討されることがなかった。本論文では、この点について検討し、フラッシオーバ電圧に電圧上昇率依存性があることを明らかにした。すなわち、がいしの汚損長や塩分付着密度によってフラッシオーバ電圧が最も低くなる上昇率があることを示している。そして、その最低フラッシオーバ電圧とそれが生ずる電圧上昇率の実験式を提示している。通常の人工汚損試験設備では印加電圧の上昇率を任意に変えることは困難である。しかし本論文の結果によれば、当該設備の特定の電圧上昇率による試験結果から、供試がいしの最低フラッシオーバ電圧を推測することが可能となることを示しており、人工汚損試験法に一つの指針を与えている。

（３）等価霧中法と共にわが国の代表的な人工汚損試験法である「定印霧中法」は乾燥した汚損がいしに一定電圧を印加してから加湿して３０分耐電圧を求める試験であり、一般に試験に要する時間が長い。また昇降法によって耐電圧を決めるため、最低値を得るのは必ずしも容易ではない。本論文では、電圧上昇法において得られた最低フラッシオーバ電圧と電圧上昇率との関係から、上昇率が零の点を外挿して得られる最低電圧が定印霧中法による最低値に近いことを示した。また、この場合定印霧中法による最低値は等価霧中法による最低値のほぼ１．６倍となることが分かった。従来各種試験法間の相関関係が不明であったが、等価霧中法と定印霧中法の最低値との関係を明らかにできたことは有意義である。

（４）自然の不平等汚損状態を模擬した実験結果から、平均的な汚損度が、電極間の全面が均一に汚損されている場合より小さい場合でも、フラッシオーバ電圧が全面汚損時とほぼ同等になる場合があることを示した。このことから、例えば耐霧がいしのように下面が深ひだのため汚損されにくい形状のがいしにおいても、ひだ間の全面が汚損されなくてもフラッシオーバ電圧が著しく低下し得ることが分かった。本論文では第４章における実験から、非汚損部の長さが電極間距離の約２０％であってもフラッシオーバ電圧が全面汚損時と同等であるという結果が得られた。これは平板がいし面上で得られた結果である。一方、懸垂吊りした円板形がいし下面のように放電空間の上が閉ざされている場合には、局部アーク放電によって汚損面から蒸発・飛散したＮａ原子が拡散し難くなる。このような場合には、フラッシオーバ電圧が全面汚損時と同等となる不平等汚損時の電極間の非汚損部の長さは２０％より大になるものと考えられる。この点は汚損耐電圧性に優れたがいしの開発・設計に対して一つの指針を与えている。

（５）従来、「同一漏れ距離のがいし連では、円板形がいし連の方が長幹がいし連よりフラッシオーバ電圧が低い」という報告があるものの、その理由については明らかにされていなかった。本論文では、この点を放電特性から説明することができた。すなわち、がいしの連結部分で局部アーク放電が連続して発生しやすい形状のがいし連はフラッシオーバ電圧が低下する傾向にあることが明らかとなり、送電線路の絶縁設計上一つの指針を与えている。

（６）日本海沿岸地域における送電線の冬期フラッシオーバ事故の原因の一つである鉄塔からの融雪塩水によるがいしの氷結について検討した。その結果、低い塩分濃度の融雪水でもがいし面では高い塩分濃度の氷結状態になり得ることを明らかにした。更に、気温の上昇や日射により氷結状態が緩みシャーベット状態になるとフラッシオーバ電圧は常温時に対して２０％も低下することが分かった。これは、送電線路の保守管理に対して一つの指針を与えている。

（７）本論文の実験においては、簡単な装置によって流し写真を撮影して局部アーク放電の伸展状況を観測した。交流フラッシオーバ現象は直流や雷インパルスのそれに比べて流し写真の同期が難しいため、従来ほとんど報告されていない。本論文では電圧上昇法を用いることにより交流課電時の流し写真の撮影を可能とした。またその結果、従来主として電圧、電流の静特性に基づいて検討されてきた交流フラッシオーバ現象を、局部放電の発生状況などの動的な特性から検討することができ、新しい知見が数多く得られた。

７．３　今後に残された問題点

最後に今後に残されたいくつかの問題点について述べる。

（１）Ｎａ原子数密度について

本論文の結果は、平等汚損、不平等汚損および氷結汚損のいずれにおいても、局部放電によって汚損面から蒸発・飛散する電離電圧の低いＮａ原子の放電空間での挙動がフラッシオーバ電圧を支配することを示唆しているものと考えられる。すなわち、フラッシオーバ時点のＮａ原子数密度が、本論文の主題である「フラッシオーバ電圧を低下させる因子」に密接に関わっていることを多くの実験結果から強く示唆する結果を得た。しかし、Ｎａ原子数密度の変化の直接測定は行われていない。これを行えば、汚損フラッシオーバ機構がより明確になるであろう。

（２）局部放電の電流について

本論文では、局部放電が各半波で連続に発生しやすい形状のがいしあるいはがいし連ではフラッシオーバ電圧が低下することを示した。しかし、フラッシオーバ半波前の電流以外の各半波の電流値については詳細に検討することができなかった。局部放電の電流値によって汚損面から蒸発・飛散するＮａ原子数が変化するものと考えられ、（１）項との関連において今後の課題となろう。

（３）塩水つらら発生時のがいしのフラッシオーバ特性について

第６章において氷結時の汚損フラッシオーバ現象について実験的に検討したが、がいしの氷結時にはつららの発生もみられ、この点の検討も必要であると思われる。両者に関する研究結果から、氷結やつららが発生しにくいがいし装置や、氷結層が脱落しやすいがいしの開発が重要な課題となろう。

謝　辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたって、終始懇切なるご指導とご鞭撻を賜った北海道大学教授 工学博士 田頭博昭先生に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、広い視野から数々の有益なご教示を戴きました北海道大学教授 工学博士 深井一郎先生、同教授 工学博士 長谷川英機先生、同教授 工学博士 長谷川淳先生に深く感謝申し上げます。

本研究は、主として秋田大学鉱山学部において遂行されたが、この間終始親身になってご指導とご鞭撻を戴きました秋田大学教授 工学博士 赤上陽出男先生、ならびに同教授 工学博士 加賀昭夫先生に対して厚くお礼申し上げます。

第５章における「汚損沿面アークの分光分析」は、著者が北海道大学工学部に内地研究員として派遣されていたときに行ったものである。この間のご指導はもとより、その後もたびたびご援助とご鞭撻を戴きました北海道大学助教授 工学博士 酒井洋輔先生、同助手 金子良松先生、同技官 澤田貞夫先生、北海道大学医療技術短期大学部教授 工学博士 下妻光男先生、ならびに田頭研究室の皆様に心から感謝申し上げます。

北海道大学名誉教授 工学博士 坂本三郎先生には、先生が秋田大学教授としてご在職以来、数々のご指導、ご援助ならびにご鞭撻を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

秋田大学鉱山学部におきましては、電気工学科 斉藤宏助教授、橋本好道技官にご助力戴き厚くお礼申し上げます。また、土木工学科 徳田弘教授、電気工学科 穴澤義久助教授ならびに秋田大学医療技術短期大学部 河村鴻允教授からもご援助戴きました。心から感謝申し上げます。さらに、ご鞭撻を戴いた電気工学科 吉村昇教授、谷口敏幸助教授、西田眞講師、伊藤正和技官、電子工学科 五十嵐隆治講師に厚くお礼申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、実験にご協力戴いた秋田大学鉱山学部電気工学科赤上研究室の多くの大学院生ならびに卒業研究生に対して深甚なる感謝の意を表します。